

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**



**“DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO  
USANDO COLONIA DE HORMIGA”**

**TESIS:**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**Lic. Jonathan Osuna Castro**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**Dr. Edén Bojórquez Mora**

**Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero**

**Culiacán, Sinaloa, julio del 2023**



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## UAS-Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional Buelna

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



## **Agradecimientos**

**A la Facultad de Ingeniería Culiacán y la Universidad Autónoma de Sinaloa, por brindar el espacio y los recursos para lograr mi capacitación como futuro Maestro en Ciencias de la Ingeniería.**

**Al Dr. Edén Bojórquez Mora, por la guía y el apoyo a través de estos años de estudio, por el apoyo, conocimientos y oportunidades brindados.**

**Al consejo Nacional De Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por la beca otorgada para el estudio de maestría, así como su apoyo a través de los Proyectos de Ciencia Básica 287103 y Ciencia de Frontera CF-2023-G-1636.**

**A la UAS-DGIP por el apoyo otorgado a través del programa PROFAPI-2022.**

## **Dedicatoria**

**Dedico este trabajo a:**

**Mi esposa Paula y nuestra pequeña hija Emma, que han estado a mi lado siendo partícipes de los esfuerzos puestos en la realización de este trabajo, quienes con su sola presencia fungen ya como un motor para seguir adelante.**

**A mis padres, Yasmina y Melchor, que igualmente con paciencia, apoyo y respeto me han permitido ser quien soy, a través de sus ejemplos de bondad y curiosidad.**

**A mis maestros, todos ellos, y en especial los que siguen a mi lado. Sus sabios consejos, cimentados sobre un cariño y respeto mutuo, me dirigieron siempre a sacar la mejor parte de mí.**

**Al Dr. Edén, por el gran apoyo que me brindó durante mi tiempo de estudio.**

**A mis compañeros de ingeniería, con los que a través de las conversaciones que sostenemos vamos encaminándonos todos al buen futuro de la ingeniería que queremos ejercer.**

**Gracias a todos ustedes**

# Índice

1.	Introducción y revisión de la literatura.....	14
2.	Planteamiento del problema .....	20
	Descripción.....	20
3.	Hipótesis .....	20
4.	Justificación .....	20
5.	Objetivos.....	22
	General.....	22
	Específicos.....	22
6.	Metodología.....	23
	Seleccionar secciones .....	24
	Análisis estructural .....	33
	Calcular costos.....	41
	Actualización de feromona.....	50
	Criterio de evaluación.....	52
7.	Diseño de edificio de concreto reforzado utilizando la técnica de colonia de hormigas 53	
	Introducción.....	53
	Modelo estructural .....	54
	Primer Ejercicio de calibración .....	59
	Segundo Ejercicio de calibración .....	64
	Modelo de estudio .....	66
8.	Implementación del método ACO: discusión.....	70
9.	Conclusiones.....	76
10.	Referencias .....	79

## Tabla de ilustraciones

Figura 1. Solución gráfica en el problema del viajante para 50 ciudades, resuelto con la metodología de Colonia de Hormigas. ....	19
Figura 2. Diagrama del ciclo de vida de una hormiga virtual. ....	23
Figura 3. Ejemplo de secciones generadas para la base de datos de columnas. ....	25
Figura 4. Ejemplo de sección generada para la base de datos de vigas. ....	29
Figura 5. Probabilidad individual de cada elemento de una base de datos, para la primera iteración (sin información de feromona). ....	31
Figura 6. Probabilidades acumuladas para la primera iteración (sin información de feromona) .....	32
Figura 7. Modelo tridimensional en Opensees del marco generado (cotas en metros). ....	37
Figura 8. Deformada típica para los análisis de carga sísmica en la dirección Y. ....	38
Figura 9. Marcos 2D generados con el programa, con numeración de nodos (cotas horizontales y verticales en metros) .....	39
Figura 10. Marcos 3D generados con el programa, con numeración de elementos. ....	39
Figura 11. Deformadas de la estructura para cargas laterales. ....	40
Figura 12. Modos de vibrar obtenidos con las funciones de Opensees (2 modo de vibración). .....	40
Figura 13. Gráfica $P_r$ — excentricidad, para una sección de diseño. ....	45
Figura 14. Gráfica $M_r - P_r$ , para una sección de diseño. ....	45
Figura 15. Modelo tridimensional del edificio de estudio. ....	54
Figura 16. Vista 2D de un marco del edificio (Cotas en m). ....	55
Figura 17. Marco tridimensional de concreto reforzado de un nivel, utilizado para fines de calibración. ....	59
Figura 18. Gráfica de costo de materiales (en pesos) vs ciclo de iteraciones. ....	60
Figura 19. Gráfica de la probabilidad acumulada de las secciones de las columnas. ....	61
Figura 20. Gráfica de la cantidad de feromona al finalizar la aplicación del método. ....	62
Figura 21. Secciones de columnas obtenidas por el algoritmo de colonias de hormigas para el marco de concreto reforzado de un nivel. ....	63

Figura 22. Secciones de vigas obtenidas por el algoritmo de colonias de hormigas para el marco de concreto reforzado de un nivel.....	63
Figura 23. Modelo de armadura, tomado de [24] .....	64
Figura 24. Volumen de acero vs número de iteración (eje horizontal). .....	65
Figura 25. Modelo 3D generado en Opensees (cotas en m).....	66
Figura 26. Evolución de los costos de la estructura vs el número de ciclo de análisis. ....	67
Figura 27. Elevación del edificio con las secciones del método de colonia de hormigas...66	
Figura 28. Secciones de vigas obtenidas tras las iteraciones del método.....67	
Figura 29. Secciones de columnas obtenidas tras las iteraciones del método .....	68

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se muestra la aplicación del algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas (ACO por sus siglas en inglés de Ant Colony Optimization) para el diseño sísmico de edificios de concreto reforzado. Para ello, los edificios estarán constituidos por secciones de concreto reforzado, cuadradas para las columnas y rectangulares para las vigas. El objetivo principal de este trabajo es demostrar el potencial de los algoritmos basados en Colonias de Hormigas a través del diseño sísmico de edificios de concreto reforzado. Los resultados muestran que el algoritmo ACO da lugar a diseños de edificios de concreto reforzado económicos y cumplen con las especificaciones del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias.



## **ABSTRACT**

This paper shows the application of the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm for the seismic design of reinforced concrete buildings. For this purpose, the buildings will consist of reinforced concrete sections, square for columns and rectangular for beams. The main objective of this work is to demonstrate the potential of Ant Colony based algorithms through the seismic design of reinforced concrete buildings. The results show that the ACO algorithm results in cost-effective reinforced concrete building designs that comply with the specifications of the Mexico City Building Regulations and its Complementary Technical Standards.

# 1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

El diseño de estructuras ha ido evolucionando durante la historia de la humanidad, siendo en sus inicios de carácter puramente empírico, construyendo estructuras similares a las estructuras existentes que pasaron la prueba de resistencia y no colapsaron [1], pasando por la época del renacimiento, en la cual se comenzaron a esbozar y aplicar teorías acerca de la resistencia y comportamiento de los materiales [2], llegando hasta el grado de complejidad y exactitud que los métodos de análisis actuales pueden permitir. Este desarrollo ha estado influenciado en parte por el auge de la computadora, y los métodos matriciales que, aunque en sus inicios se formularon por intereses teóricos ---puesto que no existía el recurso computacional para sacarles provecho, hoy permiten analizar una gran variedad de configuraciones posibles para un problema dado [3].

Dadas estas condiciones y posibilidades, han surgido, alrededor de los años sesenta, diferentes métodos de resolución de problemas de optimización, llamados heurísticos, de los cuales forma parte la elección de una configuración estructural adecuada. Estos métodos consisten en encontrar soluciones prácticas utilizando reglas de selección y calificación sencillas, en contraposición con los métodos tradicionales o directos, que tienen una formulación en la que de antemano se sabe el camino para llegar a la solución óptima, pero que fracasan en llegar a ella cuando la complejidad del problema es grande, ya que se demandan recursos computacionales elevados, lo que se traduce en tiempos inalcanzables [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12].

El objetivo del presente trabajo es aplicar la técnica heurística Optimización por Colonia de Hormigas, denominada ACO, por sus siglas en inglés (Ant Colony Optimization) a problemas de diseño de estructuras de concreto reforzado, estructuradas a base de marcos

tridimensionales. Esta técnica está inspirada en el comportamiento de las hormigas a la hora de tratar de encontrar comida, haciendo hincapié en la manera en la que se comunican y toman decisiones acerca de las trayectorias a explorar, utilizando feromonas para comunicarse de manera indirecta. [4]

La técnica de colonia de hormigas nació en 1991 como una heurística para encontrar soluciones óptimas a problemas de combinatoria. Fue primeramente aplicada al problema del viajante, que propone encontrar la ruta que minimiza el costo del viaje de una persona que tiene que pasar por un número  $n$  de ciudades, pasando una vez por cada una; pero se ha ido refinando y modificando para aplicarse a otros problemas de combinatoria, como son asignaciones cuadráticas, coloración de grafos, clasificación [10], entre otras [11].

En cuanto a los problemas relacionados con el diseño estructural, se han hecho trabajos aplicados a la optimización de armaduras planas [12], armaduras en el espacio [13], marcos de acero [14], marcos irregulares de acero [15], muros de contención [16], pilas de puentes [17], y problemas de ingeniería en general [18]. Además, en cuanto a la ingeniería civil, se ha aplicado el método a la optimización de la construcción [19].

El método está inspirado en el comportamiento de las hormigas, en lo que respecta a su manera de organizarse para encontrar rutas óptimas desde el nido a las fuentes de comida. Estas se comunican de manera indirecta, modificando el entorno al depositar químicos llamados feromonas. La cantidad de químicos que deposita una hormiga en su ruta de la fuente de comida al nido es proporcional en algunas especies a la calidad de la comida encontrada, y se ha encontrado que las hormigas tienden a seguir los caminos con mayor concentración de feromona.

Para modelar este comportamiento y poder implementarlo a la solución de problemas, Deneubourg y algunos colegas [20] propusieron un modelo estocástico sencillo que describía el comportamiento de las hormigas en el experimento de los dos caminos. Este experimento consistía en depositar una cantidad de hormigas en un circuito por el que para llegar a la comida tenían que elegir entre dos caminos. En este experimento hubo dos escenarios: en uno de ellos los largos de los caminos eran iguales, y en el otro un camino era dos veces más largo que el otro. Se observó que cuando los caminos eran de igual longitud, al final las hormigas siempre escogían uno u otro camino, sin preferencia para ninguno de los dos. Sin embargo, para el experimento con caminos desiguales, las hormigas siempre encontraban el camino más corto.

La adaptación para su implementación en computadora requiere mapear las rutas que puede seguir una hormiga como un grafo. Cada punto en el que puede estar una hormiga es un nodo o vértice, y todos los vértices están unidos por medio de arcos. La probabilidad de escoger cierto camino (arco) para avanzar de un nodo a otro está dada por la fórmula:

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum \tau_{ij}}$$

En donde  $\tau_{ij}$  es la cantidad de feromona en el arco que conecta los nodos  $i$  y  $j$ .

## **Metaheurística de Optimización por Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization)**

Tomar solo en cuenta la cantidad de feromona no sería suficiente para obtener soluciones óptimas para la gran variedad de problemas a los que se puede aplicar la metodología, puesto que estos métodos tienen a generar solo un limitado número de soluciones diferentes, o resultan en problemas de óptimos locales. Por lo que se sigue un enfoque metaheurístico para hacer más eficiente el método y para que pueda ser capaz de explorar más regiones que pueden conducir a óptimos globales.

La metaheurística resultante puede describirse en una serie de tres procesos: i) construir soluciones, ii) actualizar feromonas y iii) acciones demonio. En el primer proceso, se construyen soluciones avanzando de nodo en nodo aplicando reglas de decisión probabilísticas que se basan en factores del nodo de feromona y heurísticos (como dar preferencia a nodos más cercanos). En el segundo proceso, de actualizar feromona, una vez que una hormiga o grupo de hormigas han terminado de construir una solución se actualiza la información en los nodos en función de la calidad de la solución, depositando más feromona para soluciones de menor costo. De esta manera, futuras hormigas pueden hacer uso de esta información, y tenderán a explorar las rutas que tienen mejor calidad. En el tercer proceso, uno puede hacer uso de información adicional para favorecer manualmente zonas del espacio solución, depositando feromona para guiar a las hormigas [6].

## Problema del viajante

Los detalles del método se muestran a continuación, aplicados para el primer problema en el que se utilizó la metodología: el problema del viajante.

En este problema, que consiste en encontrar la ruta que minimiza la distancia necesaria para recorrer  $n$  puntos pasando por cada uno una sola vez, una hormiga selecciona el nodo al que tiene que avanzar con base en una regla probabilística de la siguiente forma:

$$p_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^{\alpha} [\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum [\tau_{ij}]^{\alpha} [\eta_{ij}]^{\beta}}$$

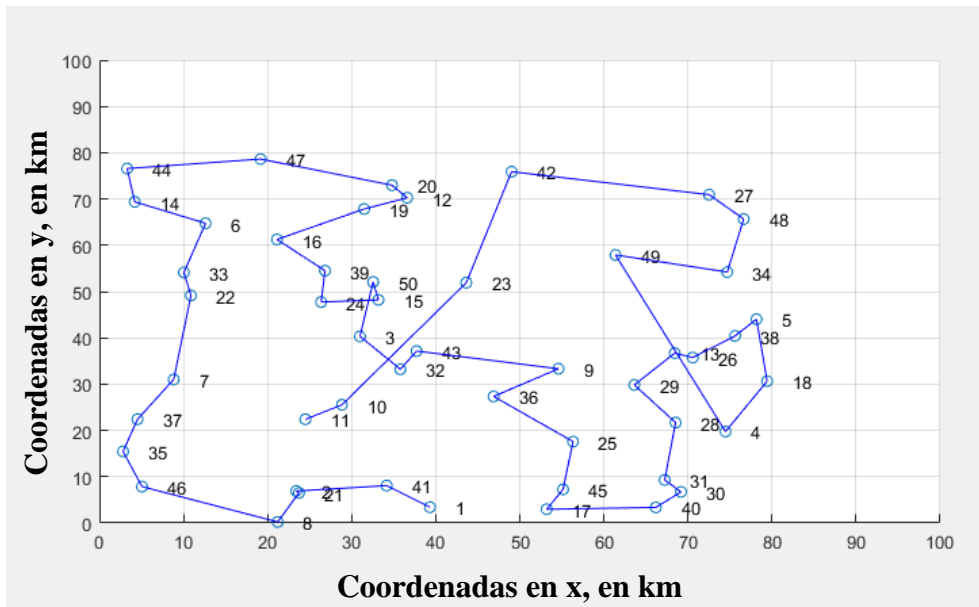
En donde  $p$  es la probabilidad de escoger el nodo  $j$  estando en el nodo  $i$ ,  $\tau$  es la cantidad de feromona entre ambos puntos,  $\eta$  el término heurístico, para este caso denominado visibilidad, y es una medida de la cercanía de la ciudad  $j$ , obligando a que tengan mayor probabilidad ciudades más cercanas; finalmente,  $\alpha$  y  $\beta$  son factores que controlan la relativa importancia entre la cantidad de feromona y el valor heurístico.

Al terminar de construir una solución, las hormigas depositan feromona en los arcos que visitaron proporcional a la calidad de la solución, que para el problema del viajante puede tomarse como el recíproco de la distancia total del recorrido.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum \Delta\tau_{ij}$$
$$\Delta\tau_{ij} = 1/C$$

En donde  $C$  es la longitud del recorrido de la hormiga que está depositando la feromona. El valor a depositar es cero si la hormiga no visitó la ciudad  $j$  desde la ciudad  $i$ .

En la figura 1 se muestra gráficamente la solución al problema del viajante para 50 ciudades, resuelto utilizando ACO con 500 hormigas.



**Figura 1. Solución gráfica en el problema del viajante para 50 ciudades, resuelto con la metodología de Colonia de Hormigas.**

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **DESCRIPCIÓN**

Se aplica el método ACO para resolver el problema de encontrar la solución de menor costo al diseño de una estructura a base de marcos tridimensionales de concreto reforzado que cumpla con todos los requisitos de seguridad y funcionalidad, como son comprobaciones de resistencia por fuerza axial, cortante, momento y sus interacciones, así como desplazamientos máximos, distorsiones de entrepiso, etc.

### **3. HIPÓTESIS**

Se pueden obtener diseños sísmicos óptimos de edificios de concreto reforzado utilizando la metodología de colonia de hormigas.

### **4. JUSTIFICACIÓN**

Es importante apoyarse en algoritmos de optimización para la toma de decisiones en problemas complejos de combinatoria, como lo es un diseño estructural, puesto que la experimentación de opciones es una parte importante de la generación de un buen diseño estructural. En la búsqueda de un diseño óptimo, no basta con saber estimar las cargas correctas, sean gravitacionales o sísmicas, que actuarán sobre el modelo, ni seleccionar métodos de análisis que estimen con precisión las respuestas estructurales para una configuración dada; también hay que poder analizar un buen número de configuraciones posibles dentro de las posibilidades del sistema estructural elegido y escoger atinadamente



entre ellas. Lo anterior, demanda muchos recursos computacionales; de hecho, realizar por fuerza todos los análisis estructurales posibles para poder seleccionar de ellos la mejor de las soluciones toma un tiempo impráctico, un esfuerzo computacional enorme, que crece exponencialmente con el tamaño del problema. Tampoco hay algoritmos establecidos para obtener soluciones óptimas de manera directa para cada problema estructural.

Para abordar estos problemas, se parte de un entendimiento práctico del mismo. Se va construyendo la solución paso a paso mediante reglas de decisión probabilísticas que nos permitan avanzar en la dirección que sea más prometedora. En el presente trabajo se analiza la aplicación de las técnicas heurísticas, que como ya se mencionó, tiene su raíz etimológica en la palabra “Eureka: lo encontré”. Una técnica de las muchas que existen en la literatura se explorará en este estudio. Se extenderá el uso que se le ha estado dando en el ámbito del diseño de estructuras, pasando de casos de estudio simplificados o muy específicos, al diseño completo de un edificio tridimensional, construible en la práctica, y que cumpla con todas las comprobaciones requeridas por el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. Se espera que con esta técnica se encuentren en un tiempo razonablemente corto y con un grado de calidad elevado soluciones óptimas, o mejores que las que permiten encontrar los limitados recursos disponibles para un individuo con un programa de computadora y un tiempo determinado para explorar las opciones que le parezcan mejor.

## **5. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Diseñar edificios de concreto reforzado sometidos a sismo utilizando el método de la colonia de hormigas minimizando el costo total de la edificación, y cumpliendo con los requerimientos de resistencia y desplazamiento del actual reglamento de la Ciudad de México.

### **ESPECÍFICOS**

- Crear base de datos de elementos estructurales de concreto reforzado
- Definir modelos estructurales de estructuras de concreto reforzado a base de marcos espaciales, característicos en la práctica.
- Desarrollo de programa de computadora para analizar y diseñar los elementos que constituyen el modelo de análisis.
- Desarrollo de un programa que implemente la metodología de colonia de hormigas al problema en cuestión.
- Obtención de resultados del diseño de acuerdo a la metodología implementada.

## 6. METODOLOGÍA

La metodología de la colonia de hormigas aplicada al problema del diseño estructural de edificios de concreto se describe en el presente capítulo. En la figura 2, se representa un diagrama del ciclo de vida de las hormigas virtuales, que ejecutan para



**Figura 2. Diagrama del ciclo de vida de una hormiga virtual.**

## **SELECCIONAR SECCIONES**

La primera actividad que se ejecuta durante la iteración de la metodología es la de seleccionar secciones de columnas y vigas, para después ejecutar el análisis estructural y evaluar la viabilidad de la selección. Estas secciones se escogen de una base de datos generada al comenzar el procedimiento. Las bases de datos para columnas y vigas se describen a continuación.

### **Base de datos de columnas**

Esta base de datos se generó considerando secciones cuadradas. Los parámetros que se variaron fueron el ancho (lado de la sección transversal cuadrada), el diámetro del acero utilizado, diferenciando entre acero en las esquinas y acero en las caras, y el número de varillas. No se incluyeron secciones variando las diferentes posibilidades para el estribado, por los motivos que se exponen más adelante.

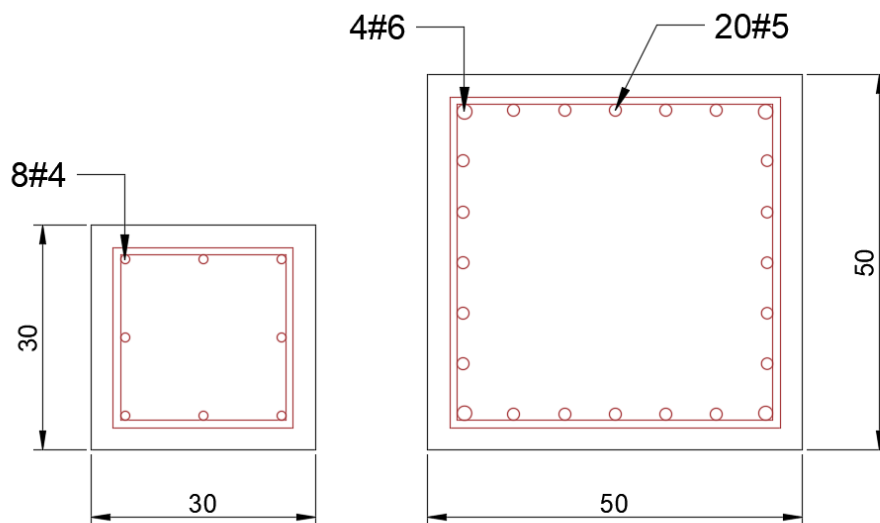
En la figura 3 se muestran unas secciones típicas producidas para la base de datos. Las secciones se generaron iterando primero los anchos, comenzando con 30 cm y aumentando 5 cm; segundo, iterando los diámetros de las varillas en las esquinas; tercero, iterando los diámetros de las varillas en las caras, sin ser estos mayores que los utilizados en las esquinas; y, por último, variando el número de varillas en las caras.

Una sección era elegible cuando cumplía con los límites en el área de acero (del 1% al 6%) y cuando la separación libre entre varillas no era menor que 4 cm. No se consideraron varillas en paquetes.

Los campos con los que cuenta la base de datos de secciones de columnas son los siguientes:

- Ancho, en cm

- Peralte, en cm
- Diámetro de acero en esquinas, en cm
- Diámetro de acero en las caras, en cm
- Número de varillas en las caras
- Área de concreto, en  $\text{cm}^2$
- Área de acero, en  $\text{cm}^2$
- Porcentaje de acero
- Costo del concreto + costo del acero longitudinal, en pesos.



**Figura 3. Ejemplo de secciones generadas para la base de datos de columnas.**

### *Estribados en la base de datos*

No se contemplaron diferentes configuraciones de estribo para formar la base de datos, sino que el diseño para fuerzas cortantes se hizo de manera directa y no a través de iteraciones, esto con el fin de reducir el número de secciones generadas y con ello la complejidad del problema. Los pasos para considerar el diseño a fuerza cortante fueron los siguientes:

1. Se estableció, según la ecuación 5.3.27 de las NTC de concreto [21] que la sección fuera adecuada para ser diseñada a fuerza cortante.
2. Se calculó la separación máxima de los estribos de acuerdo a las consideraciones de las normas.
3. Se calculó el área de acero a cortante necesaria, tomando en cuenta la separación establecida de los estribos. Para esto se seleccionó un diámetro del estribo, en función del tamaño de la sección (No.3 para secciones de menos de 60 cm, No. 4 para el resto), y a continuación, el número de ramas necesarias para obtener el área de acero requerida.
4. Se cuantificó la cantidad de acero provista.

Es importante observar qué, aunque existan otras configuraciones que también cumplan con la resistencia a cortante requerida para la sección, todas se basan en el área de acero que atraviesa una potencial grieta diagonal, de manera que colocando estribos menos espaciados se requiere más área, de una manera proporcional al aumento del espaciamiento; o colocando un mayor diámetro —o hasta estribos dobles— se requerirían menos ramas de estribos.

El diseño a fuerza cortante se hizo tomando en cuenta los puntos más demandados de la columna, que son los extremos, de manera que en un diseño final los estribos indicados por el programa de cálculo escrito solo serían colocados en cierta distancia del apoyo; a partir de este punto podrían modificarse, reduciendo la cantidad de acero colocada, con la subsecuente reducción en el costo de estribado. Estos puntos de corte ocurren casi siempre en  $L/4$ .

Los parámetros seleccionados para formar la base de datos de las columnas y vigas fueron los suficientes para abarcar todas las variantes que controlan el diseño de un edificio de concreto reforzado en su conjunto. Por ejemplo:

- El ancho de las columnas afecta principalmente al cumplimiento de las distorsiones de entrepiso. Estas distorsiones dependen directamente de las áreas y momentos de inercia de diseño.
- El área de acero y su distribución afectan directamente la resistencia a flexo-compresión, dada un ancho de la columna. Aunque está presente la posibilidad de que se obtengan mayores resistencias y menor costo a mayor área de concreto y menor área de acero, por norma al aumentar el área de concreto también se tiene que aumentar el área de acero y cumplir con el 1% mínimo.

### **Base de datos para vigas**

Esta base de datos se generó para secciones rectangulares. Los parámetros que se variaron fueron el ancho y el peralte, en incrementos de 5 cm; el diámetro y la cantidad de varillas en cada lecho.

El ancho se varió entre 25 cm y 60 cm, y los peraltes entre 50 cm y 100 cm. Los diámetros utilizables para las varillas fueron del No.4, No.5, No.6 y No. 8.

Una sección era adecuada cuando el peralte era mayor o igual que 2 veces el ancho, cuando las áreas de acero máximo y mínimo no excedían a las especificadas en las NTC, y cuando la separación libre entre las varillas no era menor a la permisible.

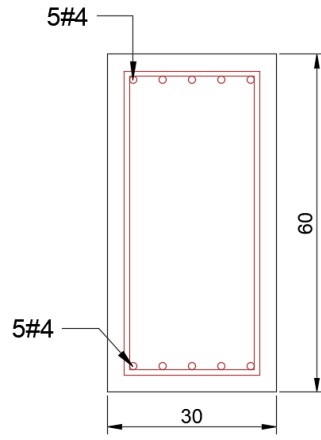
Se procuró que el acero fuera el mismo en ambos lechos. Esto se justificó notando que la demanda en ambos lechos es similar en los puntos más críticos para el diseño. Se puede realizar una optimización adicional eliminando manualmente el acero que está en exceso.

El diseño por cortante se realizó de la misma manera que en las columnas, por lo que no se incluyeron los parámetros de los estribos en la base de datos. Los campos utilizados para el método fueron los siguientes:

- Ancho, en cm
- Peralte, en cm
- Diámetro de acero en esquinas, en cm
- Diámetro de acero en las caras, en cm
- Número de varillas en las caras
- Área de concreto, en  $\text{cm}^2$
- Área de acero, en  $\text{cm}^2$
- Porcentaje de acero
- Costo del concreto + costo del acero longitudinal, en pesos.

En la figura 4 se muestran secciones típicas producidas para la base de datos.





**Figura 4. Ejemplo de sección generada para la base de datos de vigas.**

## Regla de decisión

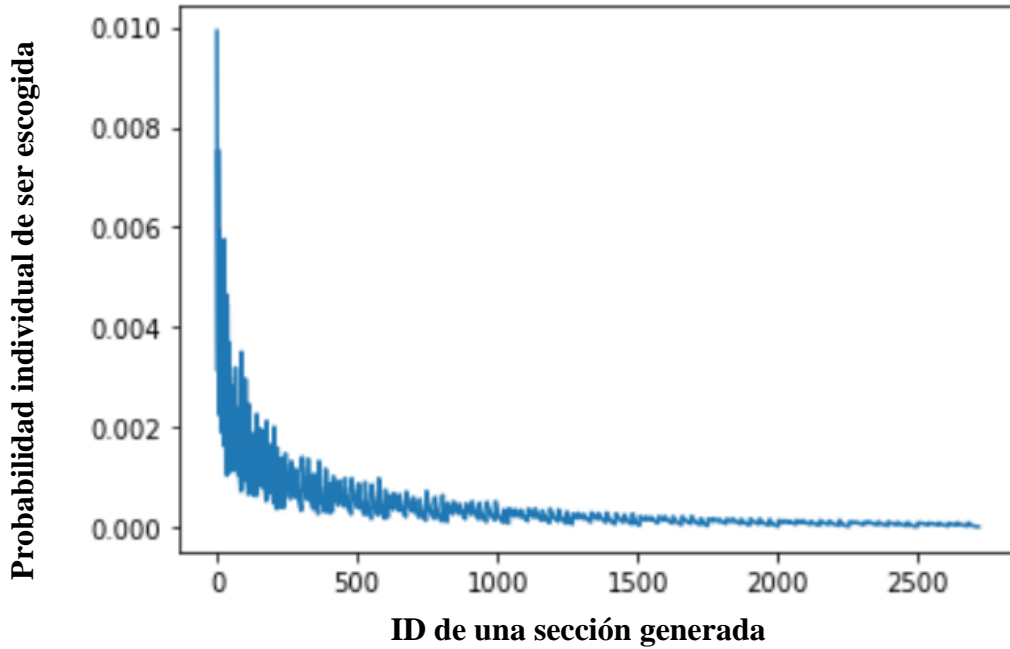
La probabilidad de escoger una sección “j”, para el elemento o grupo de elementos “i” está dada por la siguiente fórmula, tomada de [X]:

$$a_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum \tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}$$

En donde  $a_{ij}$  es la probabilidad de escoger la sección  $j$  para el elemento  $i$ ,  $\tau_{ij}$  es la cantidad de feromona de la sección  $j$ ,  $\eta_{ij}$  es el parámetro heurístico para dar valor a una sección, llamado de visibilidad (por los orígenes de la metodología), que en el caso de las estructuras se tomará como el recíproco del costo de la sección, y  $\alpha$  y  $\beta$  son los factores que afectan la importancia de los parámetros de feromona y visibilidad.

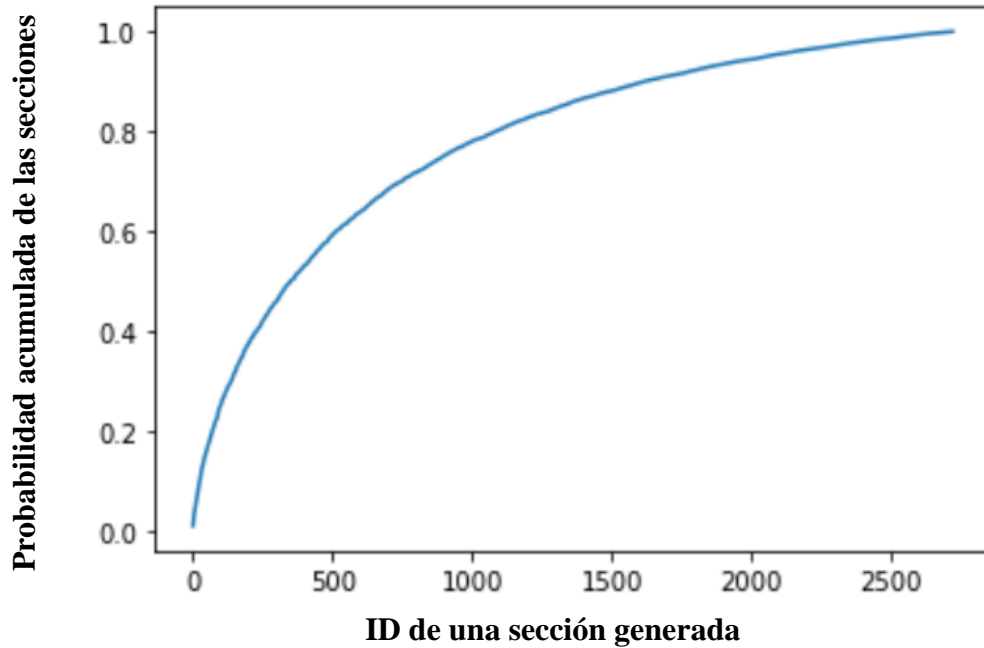
Teniendo la probabilidad de cada elemento, se procede a obtener un número aleatorio que sirva como base de elegir la sección. Se escoge una sección cuando la probabilidad acumulada de dicha sección sea mayor que el número aleatorio.

Poniendo como ejemplo las columnas, en la primera iteración la matriz de feromonas tiene valores unitarios en todos sus elementos. de manera que solo el costo de la sección contribuye a su probabilidad de ser escogida. Esto se muestra gráficamente en la figura 5. Las abscisas corresponden a la probabilidad individual de cada sección de columna de ser escogida. La suma de todos estos valores por lo tanto es la unidad. Las secciones de menor costo cuentan con una probabilidad mayor.



**Figura 5. Probabilidad individual de cada elemento de una base de datos, para la primera iteración (sin información de feromona).**

En la figura 6 se muestra la gráfica de la probabilidad acumulada. El mecanismo real para “sortear” una sección consiste en generar un número aleatorio entre el 0 y el 1, y escoger la primera sección (recorriéndolas de menor a mayor) que tenga una probabilidad acumulada mayor al número sorteado. Se puede observar que el 50% de probabilidad recae en el primer quinto de las secciones para la primera iteración.



**Figura 6. Probabilidades acumuladas para la primera iteración (sin información de feromona)**

Las secciones de columnas están ordenadas por anchos de columnas crecientes, y dentro de un mismo ancho, para porcentajes de acero crecientes, por lo que, en general, a mayor ID de sección, es mayor el costo de la misma. La primera sección de la lista tiene un ancho de 30x30 cm, y un porcentaje de acero del 1%, mientras que la última es una sección de 1.00 x 1.00 m, con un porcentaje de acero del 6%.

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

### **Programa de análisis estructural**

Para realizar el análisis estructural se desarrolló un código en el lenguaje de programación Python, a excepción de las funciones para resolver el sistema estructural, para el cual se utilizaron los módulos Openseespy de Opensees. Se optó por un lenguaje de programación en lugar de un programa de cálculo (como SAP o ETABS) debido a la necesidad de correr análisis de manera iterativa, variando los parámetros de las secciones transversales de vigas y columnas, ejecutar funciones que alimentaran las bases de datos de feromona y tener un registro de la evolución de los cálculos con el tiempo.

Entre los módulos escritos se encuentran los siguientes:

- Módulo principal, que organiza y llama a los demás módulos
- Módulo de configuración, que contiene todas las variables que definen el problema, como el número de pisos, número de crujías, dimensiones de las mismas, etc. Genera la geometría e inicializa variables.
- Módulo ACO, que contiene todas las funciones referentes a la metodología ACO, como seleccionar las secciones en función del costo y la cantidad de feromona, las funciones para la actualización de la feromona, y las funciones de penalización. Se agruparon en el mismo módulo con el fin de manipular de manera más eficaz los parámetros que condicionan el comportamiento de la metodología.
- Módulo de análisis estructural, que contiene las funciones para ejecutar los análisis estructurales para cada condición de carga (muerta, viva, sísmica) y almacenar los elementos mecánicos de todos los elementos y los desplazamientos de todos los

nodos. Para resolver el sistema estructural se utilizaron las funciones del módulo de Opensees.

- Módulo para el cálculo de violaciones, que contiene las funciones para validar las comprobaciones en cada elemento, y en cada nodo, así como para generar las combinaciones de carga.
- Módulo de comprobaciones basado en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Concreto, que contiene las funciones para evaluar las fórmulas de resistencia del reglamento; es llamado por el módulo de violaciones
- Módulo de costos, que contiene las funciones necesarias para calcular los costos mínimos, máximos, los costos en cada iteración, los costos de los elementos estructurales diseñados durante la ejecución del programa (como el estribado), etc.

## **Cargas**

Las estructuras analizadas por el programa escrito admiten el cálculo por cargas de peso propio, distribuidas sobre vigas y columnas provenientes de cargas de losa y cargas vivas, y cargas sísmicas laterales, tomando en cuenta el peso del edificio de acuerdo a los elementos estructurales utilizados en la iteración en curso. Los valores utilizados para el modelo se indican en el capítulo 7.

Las cargas de los pesos propios de los elementos modelados se introdujeron como cargas por unidad de longitud sobre cada elemento y en la dirección de la gravedad, tanto para columnas como para vigas. Estas cargas se tomaron del producto del área gruesa y el peso volumétrico del concreto, considerado como  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

Las cargas muertas de los elementos no modelados se seleccionaron suponiendo una losa reticular de 25 cm de espesor, resultando en un peso de  $300 \text{ kg/m}^2$ .

Las cargas vivas se seleccionaron de acuerdo a la tabla 6.1 de las Normas Técnicas Complementarias: Criterios y Acciones de Diseño, para el uso del inciso b) Oficinas, despachos y laboratorios. El valor de carga viva máxima indicado es de  $250 \text{ kg/m}^2$ .

Las cargas vivas accidentales, para utilizarse en el peso sísmico para el análisis por sismo se seleccionaron también de la tabla 6.1 de las Normas Técnicas, con un valor de  $180 \text{ kg/m}^2$ .

## **Análisis estructural**

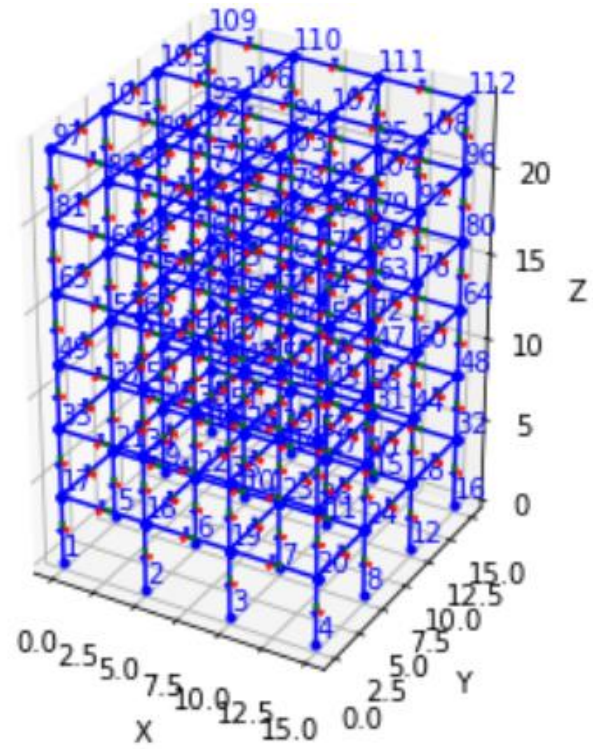
Los análisis realizados fueron tridimensionales, estáticos lineales y de primer orden. Es posible la implementación de análisis de segundo orden con las funciones ya contenidas en el módulo de Opensees.

Las unidades utilizadas para el análisis fueron kg para las fuerzas, y metros para las longitudes. Tras el análisis y donde resultara conveniente, se transformaban los kg a toneladas y los metros a centímetros.

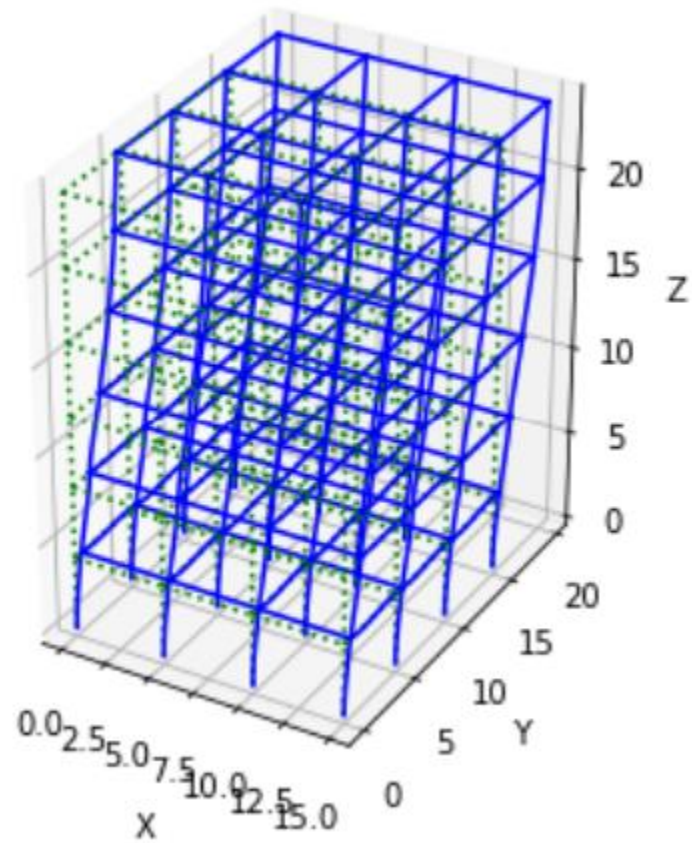
Los apoyos se consideraron como empotrados en la base. Por cada iteración del método se realizaron 4 análisis estructurales, correspondientes a las condiciones de carga de carga muerta, carga viva, sismo en X y sismo en Y, posteriormente se realizó la combinación de cargas.

En la figura 9, se muestra una evidencia del modelo de análisis creado en Opensees. En la figura 10 se muestra una deformada típica para la fuerza sísmica aplicada en la dirección Y para el último análisis.



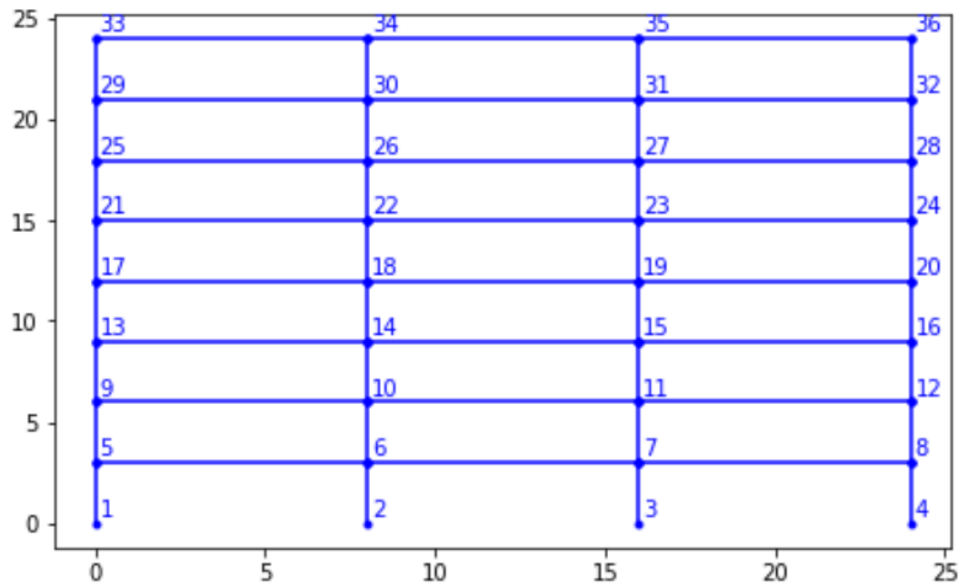


**Figura 7. Modelo tridimensional en Opensees del marco generado (cotas en metros).**

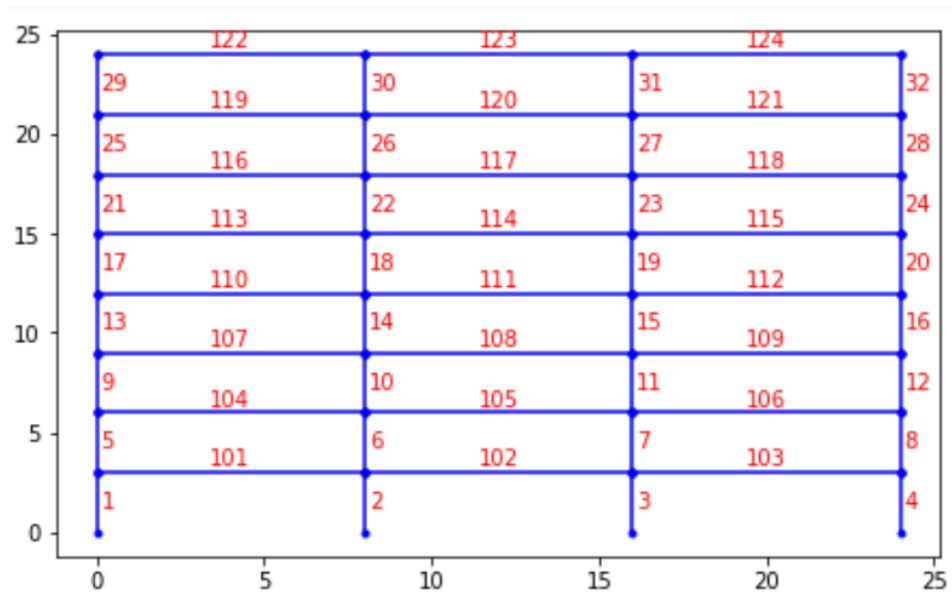


**Figura 8. Deformada típica para los análisis de carga sísmica en la dirección Y.**

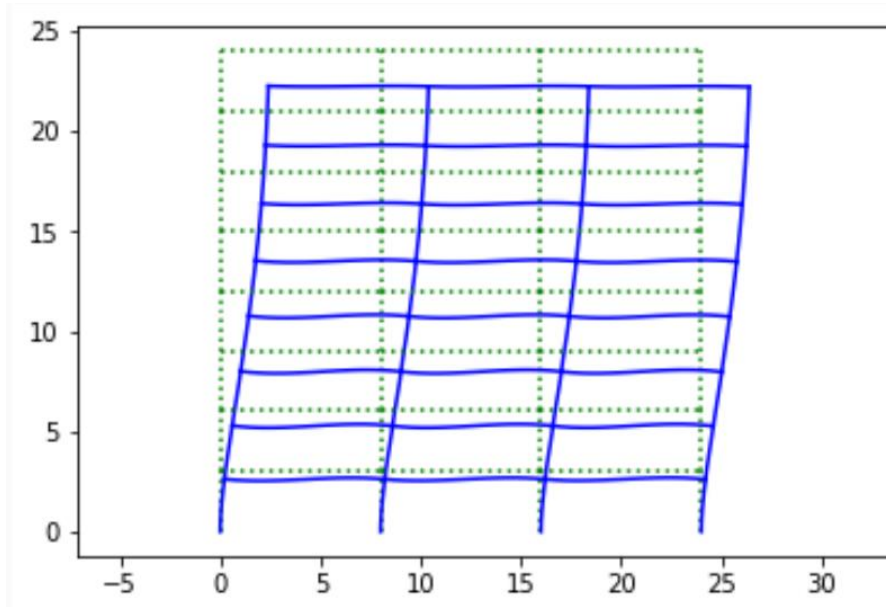
En las figuras 11 a 14 se muestran los modelos generados para aplicar el problema en 2D, código que fue generado como transición al análisis en 3 dimensiones.



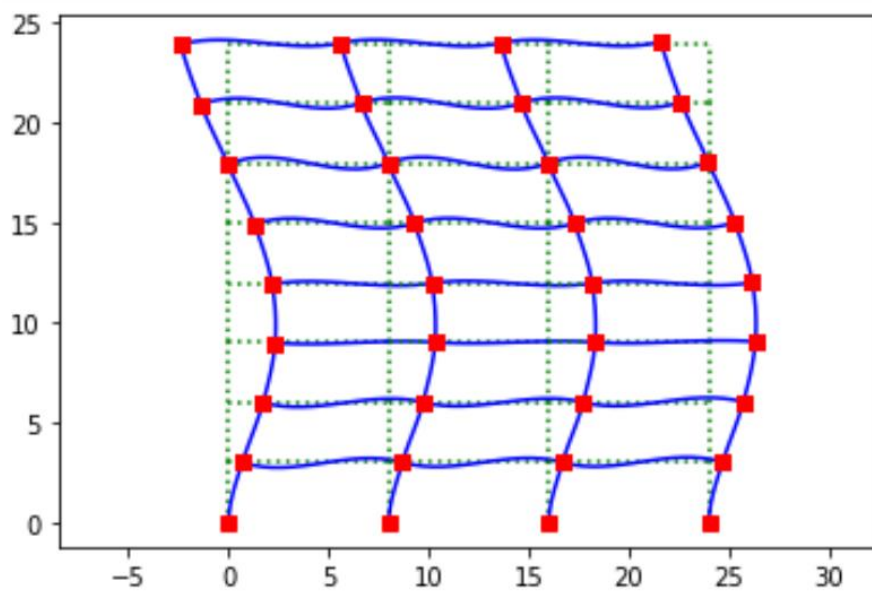
**Figura 9. Marcos 2D generados con el programa, con numeración de nodos (cotas horizontales y verticales en metros)**



**Figura 10. Marcos 3D generados con el programa, con numeración de elementos.**



**Figura 11. Deformadas de la estructura para cargas laterales.**



**Figura 12. Modos de vibrar obtenidos con las funciones de Opensees (2 modo de vibración).**

## CALCULAR COSTOS

El costo de los materiales se utilizó como la función objetivo a minimizar. Para este estudio proviene de dos fuentes; por un lado, del costo real de las secciones de los elementos utilizadas para el análisis final, resultante del costo del concreto y del acero utilizados, y, por otro lado, de un factor de penalización, que es la manera en la que se toma en cuenta si una sección es adecuada o no.

Como el método consiste en encontrar las soluciones de menor costo, mientras que cumplan a la vez con todas las comprobaciones de resistencia y deformaciones, a las secciones que son baratas pero que no cumplen con criterios de resistencia se les asigna un factor de penalización mayor a la unidad y función del tamaño de la violación, para hacerla “indeseable”, más costosa, y así poder incluir la validez de una solución en la misma función de costo. Por ejemplo, una sección en la que el momento actuante sea mayor que el resistente, tendrá una penalización igual a  $k * Mu/Mr - 1$ , en donde  $k$  es un factor de importancia de la violación, tomado como la unidad para esta comprobación en específico.

## **Costo real**

Para el costo real de la estructura en cada iteración se tomó en cuenta el costo del concreto, obtenido como el producto del volumen del concreto por un precio unitario de \$2,500, más el costo del acero, obtenido como los kilogramos de acero por un precio unitario de \$40 por kilogramo.

En la realidad, el costo de un edificio tendrá obviamente valores mayores a los obtenidos de esta manera, porque se debe incluir además el costo de la mano de obra y un gran número de conceptos adicionales. Sin embargo, todos los costos adicionales se pueden considerar relacionados directamente con el costo de los materiales, por lo que se considera el costo del material como una medida válida del costo total de la estructura, dado que los demás crecen proporcionalmente al costo del material.

## Violaciones

Una violación ocurre cuando una comprobación no es adecuada. Por ejemplo, cuando el momento actuante en una viga excede al momento resistente, o cuando la deformación calculada excede a la permisible, o cuando el ancho de una viga seleccionada es mayor que el ancho de la columna a la que se conecta.

Numéricamente, la medida de una violación está expresada por la fórmula general X, en donde U es la demanda, R la resistencia, y K un factor de importancia de la violación en cuestión.

$$v = K * \max \left( \frac{U}{R} - 1, 0 \right)$$

El factor K se consideró unitario para las comprobaciones de resistencia, mientras que se utilizó un  $K = 2$  para las comprobaciones de deformaciones. Lo anterior debido a que es más fácil “arreglar” una violación por resistencia, agregando más refuerzo de manera local, por ejemplo, que una violación por distorsiones de entrepiso, en la que inevitablemente se tienen que modificar las dimensiones de las secciones de los elementos.

Para poder evaluar la idoneidad de la estructura en función de sus violaciones, el valor de las violaciones acumulado se normalizó respecto al total de las comprobaciones hechas, esto con el fin de poder realizar en cualquier momento más o menos comprobaciones sin alterar el significado del valor de las conexiones. Así, un valor de v igual a la unidad implicaría que, en promedio, todas las comprobaciones se excedían en un 200%.

### ***Violaciones por deformaciones laterales***

Para las violaciones por deformaciones laterales, se consideró el límite establecido en las NTC para diseño por Sismo, en la tabla 4.2.1, correspondiente al tipo de estructuras a base de marcos de ductilidad baja. El valor de la distorsión máxima de entrepiso es  $\gamma = 0.015$ .

### ***Violaciones por resistencia***

#### *Columns*

Para las columnas se verificó que se cumplieran con las siguientes comprobaciones para todas las combinaciones de carga:

- Flexo-compresión
- Cortante en un elemento a flexo-compresión (en ambos sentidos)

La flexo-compresión se revisó con las fórmulas 5.2.1 y 5.2.2 de las NTC de concreto. Las tablas de interacción de fuerza axial vs excentricidad y de momento resistente vs fuerza axial, se generaron siguiendo la metodología encontrada en [25]. Estas tablas se encuentran graficadas en las figuras 13 y 14.



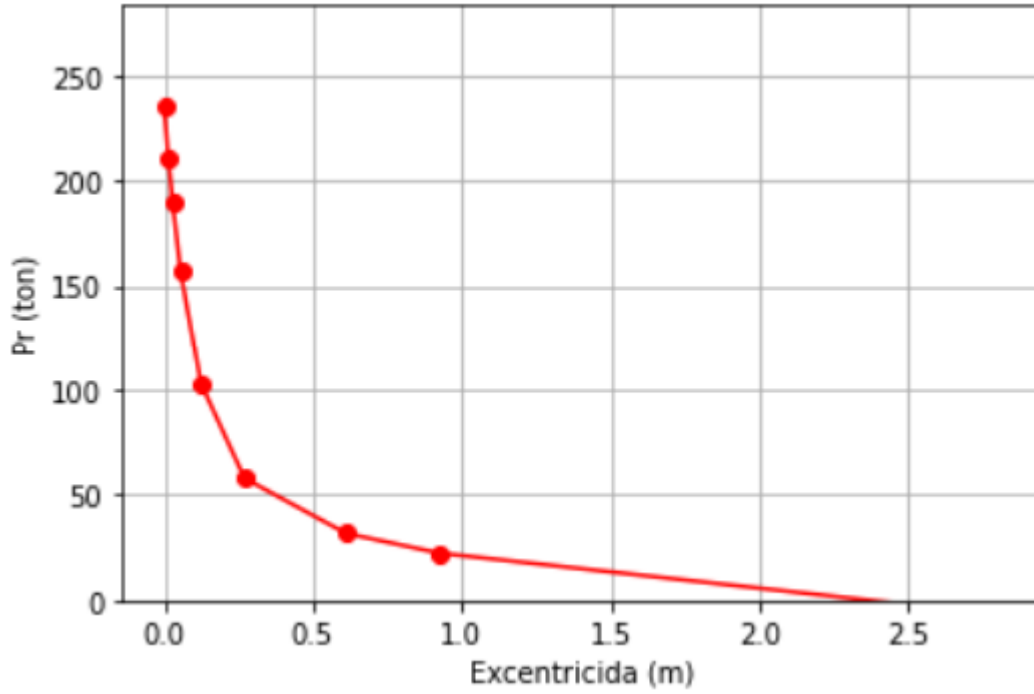


Figura 13. Gráfica Pr — excentricidad, para una sección de diseño.

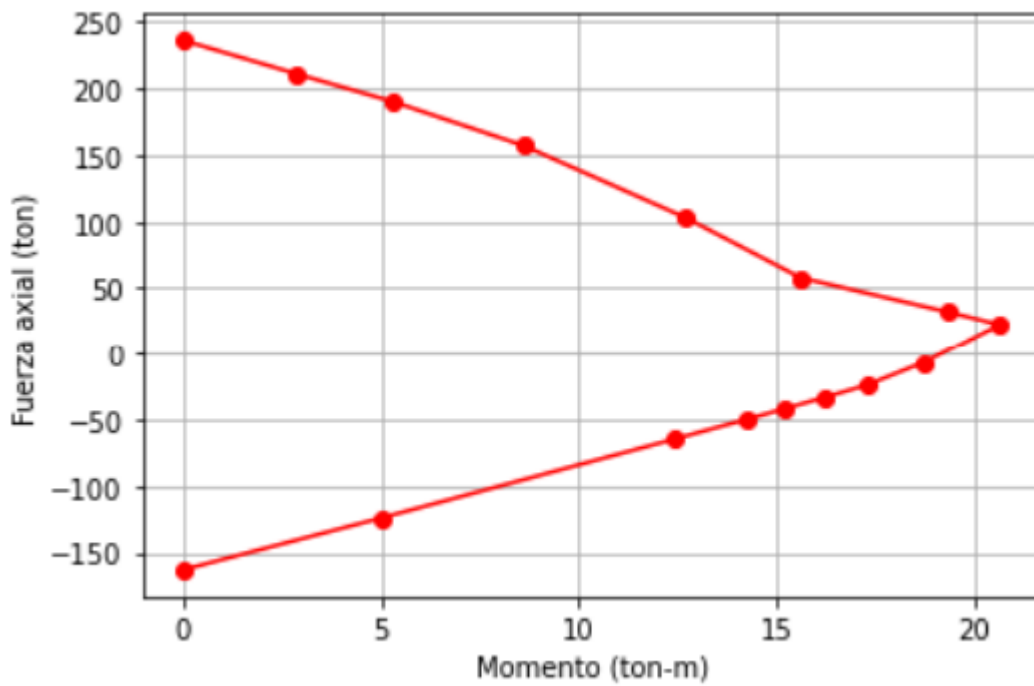


Figura 14. Gráfica Mr — Pr, para una sección de diseño.

Las violaciones se calculan, de forma general, con la fórmula siguiente, en donde D es la demanda y R la resistencia.

$$v = K * \max\left(\frac{D}{R} - 1, 0\right)$$

### *Vigas*

Las vigas se comprobaron para todas las combinaciones de carga, en el nodo inicial, final y al centro del claro, haciendo dos comprobaciones —flexión y cortante— por nodo, dando un total de 32 comprobaciones por viga.

- Flexión (en los apoyos y al centro del claro)
- Cortante (en los apoyos)

### ***Fórmulas de resistencia***

A continuación, se presenta una recopilación de las fórmulas utilizadas para evaluar resistencias y límites en la cuantía de acero, tomadas de las Normas Técnicas Complementarias para el diseño de concreto [21].

$$V_R = V_c + V_s$$

$$V_R = F_R(0.20 + 20\rho) \left( 1 + 0.007 \frac{P_u}{A_g} \right) \sqrt{f'_c} bd$$

$$V_s = F_R A_v F_y \frac{d}{s}$$

$$M_R = F_R A_s f_y d (1 - 0.5q)$$

$$q = \rho_s \frac{f_y}{f'_c}$$

$$A_{s,max} = 0.75 \frac{f'_c}{f_y} \frac{\beta_1 f_y}{f_y + 6000} bd$$

$$A_{s,min} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c}}{f_y} bd$$

$$V_R = V_c + V_s$$

$$V_c = F_R(0.20 + 20\rho) \sqrt{f'_c} bd$$

$$\rho = \min(0.015, \rho)$$

$$V_s = F_R A_v F_y \frac{d}{s}$$

### *Violaciones por restricciones geométricas*

Se comprobó que en cada nudo el ancho de las vigas sea menor que el ancho de las columnas, y que el ancho de las columnas superiores fuera menor o igual al ancho de las columnas inferiores. El factor de importancia para esta comprobación fue de  $K = 3$ .

$$v = K * \max\left(\frac{b_v}{b_c} - 1, 0\right)$$

En donde:

- $b_v$ , ancho de la viga
- $b_c$ , ancho de la columna que soporta a la viga

## **Factor de penalización**

Al finalizar la acumulación de todas las violaciones para todos los elementos de la estructura, incluyendo las de deflexiones y otras violaciones, se calcula un factor de penalización, con la siguiente fórmula:

$$f_p = (1 + \gamma v)^\omega$$

En la que  $v$  es la magnitud de las violaciones totales, dividida entre el número total de comprobaciones realizadas. Así, una violación de 0.5, significaría que, en promedio, todas las comprobaciones se exceden en un 50%, como se explicó antes. Por otro lado,  $\gamma$  y  $\omega$  son factores para controlar la importancia de las penalizaciones, siendo los de la literatura típicamente 0.73 y 1.1, respectivamente para este tipo de problemas.

Finalmente, el costo de la estructura se afectará en función del factor de penalización de acuerdo a la fórmula:

$$W = w(1 + f_p)$$

En donde  $W$  es el costo penalizado, y  $w$  el costo real de la estructura. Es de esta manera en la que se toman en cuenta la no viabilidad de una combinación de secciones por el hecho de estar sub-diseñada, haciéndola más cara, por lo tanto, menos deseable.

## ACTUALIZACIÓN DE FEROMONA

La actualización de feromona es el proceso en el que se alimenta la matriz que mide la idoneidad de una solución. La fórmula general para actualizar el valor de la feromona es la siguiente:

$$\tau_{ij}(t + n) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \lambda \cdot \Delta\tau_{ij}^+ + (\lambda - \mu)\Delta\tau_{ij}^r$$

El primer término del lado derecho de la igualdad es un factor de “evaporización de feromona”. Este término ayuda a propiciar que ciertas soluciones no crezcan tan rápido, disminuyendo los valores de todas las entradas de la matriz, propiciando una igualación en los valores de todas las soluciones con el fin de motivar una exploración.

El parámetro  $\rho$  controla esta evaporización; rondó en este trabajo entre 0.10-0.40. El hecho de que agregar feromona sea con una suma y restar feromona sea con una división permite que matemáticamente haya una tendencia al equilibrio, que solo se rompe cuando de verdad una solución valiosa ha sido encontrada y contrarresta la pérdida de feromona.

En el primer ciclo, la matriz de feromona tiene valores unitarios. En cada ciclo subsecuente, se procuró que la máxima cantidad de feromona que pueda depositar una hormiga sea de X unidades, para no crear una concentración excesiva respecto a la unidad inicial, y generar una convergencia rápida pero inadecuada.

La feromona depositada tras un ciclo de análisis estructurales es inversamente proporcional al costo de la estructura: a menor costo, mayor cantidad de feromona. Para esta maniobra se utilizaron costos normalizados respecto al menor costo posible de la estructura según los elementos más pequeños de la base de datos. Esta acción de normalización permite al

programa poder ajustarse a las diferentes órdenes de magnitud que puede alcanzar un modelo de análisis.

### **Acción demonio**

Tras finalizar un ciclo de análisis, las  $n$  hormigas que participaron en el ciclo se ordenan en función del costo que generaron, del menor al mayor. Este orden sirve para activar las “acciones demonio”, en particular la que limita a las  $\lambda$  hormigas mejores a depositar feromona en la matriz. El orden en el que se encuentra una hormiga tras haber sido ordenadas adiciona un factor adicional a la cantidad de feromona que puede depositar cada hormiga. Este factor se expresa por el término  $FI = \lambda - \mu$ , donde  $\lambda$  es el número de hormigas que depositan, y  $\mu$  es el rango de la hormiga que está depositando.

El valor a depositar se obtiene con la fórmula:

$$\Delta = FI * K/CC$$

En donde  $CC$  es el factor de calibración de costos que procura que el orden de magnitud del valor a depositar en la matriz de feromonas no exceda a las centenas, manteniéndose generalmente entre la decena y la centena, para evitar un sesgo temprano.

## **CRITERIO DE EVALUACIÓN**

La metodología se aplicó para un número fijo de análisis estructurales. Concretamente, para 50 ciclos de análisis, de 50 análisis cada uno, dando un total de 2500 análisis estructurales. Para este tipo de problemas también es posible la implementación de un criterio de aceptación, en que la solución del problema se obtenga al cumplirse un criterio de convergencia, por ejemplo, cuando el costo de la estructura en  $n$  análisis sucesivos no varíe más allá de cierto porcentaje del costo anterior.

Los resultados obtenidos para los 2500 análisis realizados para el modelo estructural en cuestión se presentan en el capítulo de resultados.



## **7. DISEÑO DE EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO LA TÉCNICA DE COLONIA DE HORMIGAS**

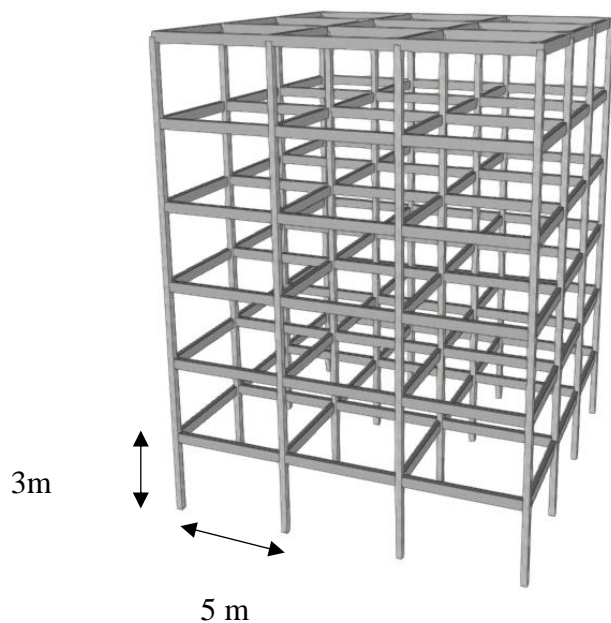
### **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior al problema específico del diseño de un edificio con características que se establecen a continuación. Primero, se describe el modelo empleado y su justificación, posteriormente, se describen los resultados.

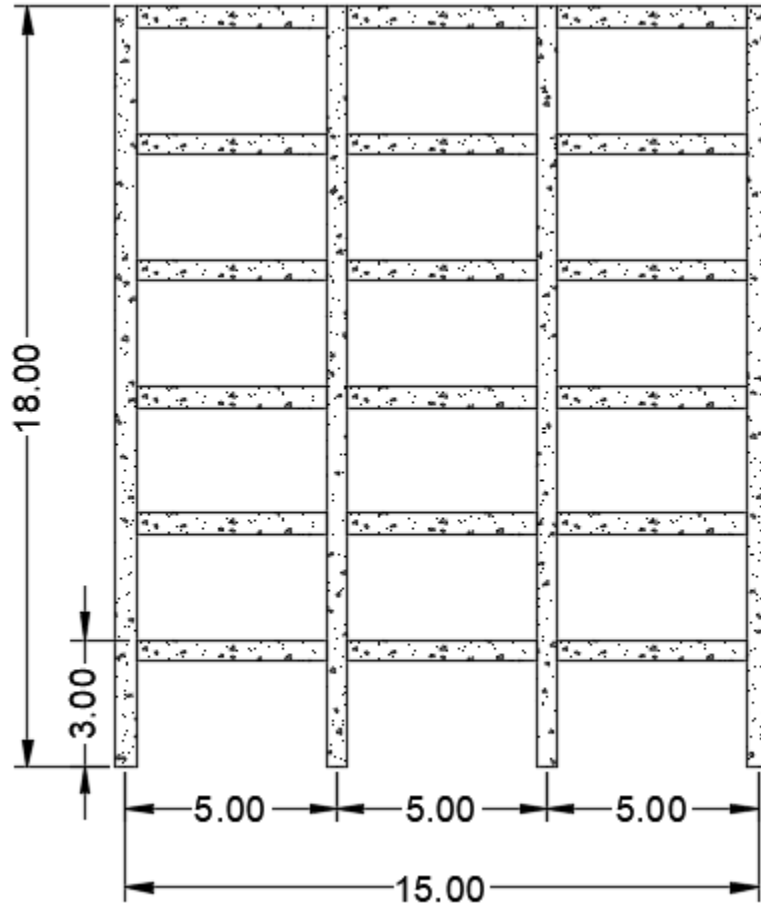
## MODELO ESTRUCTURAL

### Geometría

El modelo de estudio consistió en un edificio de 6 niveles, de 3 m por nivel, dando una altura total de 18 m. En la figura 16 se muestra la planta y elevación de dicho edificio, y en la figura 26 se muestra el modelo tridimensional generado en Opensees. La altura del modelo se restringió de manera que se pudiera aplicar el método estático para el análisis sísmico. Los tamaños de los tableros se seleccionaron de manera que se trate de representar un edificio típico de oficinas de la región del noroeste de México.



**Figura 15. Modelo tridimensional del edificio de estudio.**



**Figura 16. Vista 2D de un marco del edificio (Cotas en m)..**

Para el dimensionamiento de los elementos estructurales se realizó un agrupamiento de elementos. Se decidió asignar la misma sección de columna a las columnas de un mismo nivel como criterio práctico de ingeniería. Una manera alternativa sería generar dos grupos de columnas por nivel, uno para las columnas interiores y otro para las columnas exteriores. Se hicieron consideraciones similares a las columnas de agrupamiento para las vigas.

El código escrito permite generar los números deseados de grupos –por ejemplo, dos tipos de columnas por nivel—, de manera que en estudios posteriores se exploren nuevas áreas de optimización, a costa de una mayor cantidad de secciones diferentes.

En este trabajo se tomó la decisión de mantener la complejidad numérica del problema en un nivel medio-bajo, para facilitar tanto los tiempos de cómputo como para mejorar la hipotética facilidad de construcción del edificio generado, dado que, a mayor número de secciones diferentes de diseño, mayor es la complejidad de la ejecución en campo, aumentando probablemente los tiempos de la misma, y, por ende, los costos finales de la obra. Esto conduciría a que los resultados aquí expuestos serían solo parcialmente adecuados, dado que los factores ajenos al costo directo derivados de la complejidad de la construcción comenzarían a cobrar más importancia y deberían incluirse en la función objetivo.

## **Cargas de diseño**

### *Acciones permanentes y variables*

Se seleccionó una carga de losa de  $270 \text{ kg/m}^2$ , correspondiente al peso de una losa reticular de 25 cm de peralte. Esta carga se introdujo como una carga distribuida sobre las vigas, tal como lo permiten las NTC.

Para considerar el peso propio de los elementos estructurales del modelo, como son las columnas y las vigas, se extrajeron de la base el área de cada elemento, y se multiplicó por un peso volumétrico de concreto de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Tanto para columnas y vigas se aplicó el peso como una carga distribuida a lo largo de su longitud, actuando en la dirección de la gravedad.

La carga viva máxima correspondiente al uso hipotético del edificio fue de 290 kg/m<sup>2</sup>. Para el análisis por cargas sísmicas, la carga viva accidental fue de 100 kg/m<sup>2</sup>.

### *Acciones accidentales*

Para las cargas del sismo, se consideraron los siguientes factores que rigen el método estático:

- $c = 0.86$
- $R = 2$
- $Q = 2$

En donde:

- $c$  es la ordenada espectral como fracción de la aceleración de la gravedad, correspondiente a la meseta del espectro de diseño; coeficiente que indica el valor de dicha ordenada
- $R$  es el factor de reducción por sobre-resistencia
- $Q$  es el factor de reducción por comportamiento sísmico

Estos valores corresponden a un edificio de concreto reforzado, ubicado en una región tipo, con un efecto de amplificación en las aceleraciones debido al tipo de suelo intermedio, diseñado con el criterio de ductilidad baja.

Para cada iteración, se consideró el peso sísmico del edificio, considerado como la suma del peso de la losa, del peso de los elementos utilizados en la iteración correspondiente, y la fracción de carga viva máxima (llamada también carga accidental) especificada anteriormente.

## **Factores de carga**

Los factores de carga para las diferentes combinaciones de acciones corresponden a los señalados en las NTC sobre Criterios y Acciones de Diseño.

Para las combinaciones con acciones permanentes y variables se utilizó 1.3 para las acciones permanentes y 1.5 para las acciones variables.

Para las combinaciones con acciones permanentes, variables y accidentales se utilizó 1.1 para las acciones permanentes y variables, 1.1 para las acciones accidentales en un sentido, y 0.33 para las acciones en un sentido ortogonal al anterior.

## **PRIMER EJERCICIO DE CALIBRACIÓN**

Antes de describir los resultados del edificio en estudio, se muestran los resultados de dos modelos utilizados para la calibración del método.

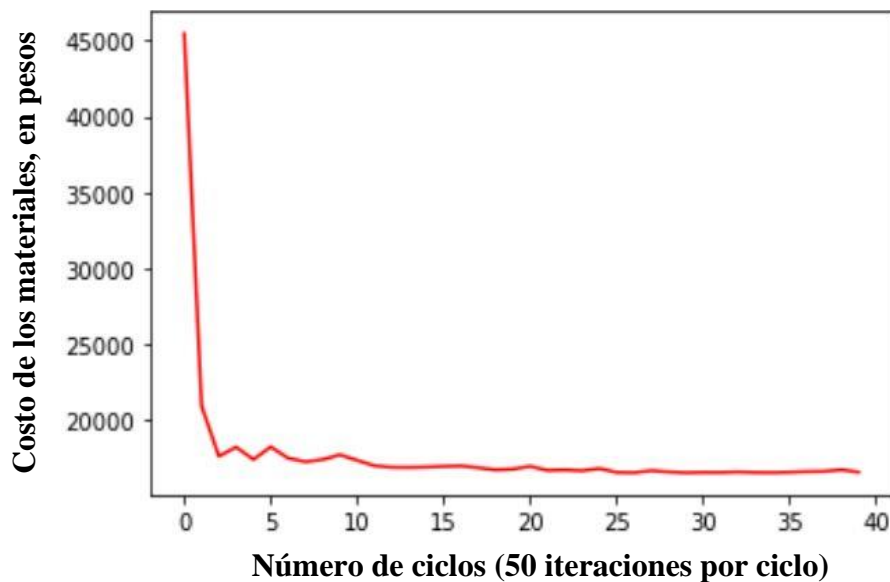
El primer modelo consistió en una estructura a base de marcos tridimensionales, de una crujía por dirección y de un nivel, con separación entre columnas de 5.00 m, tal como el que se muestra en la figura 18.



**Figura 17. Marco tridimensional de concreto reforzado de un nivel, utilizado para fines de calibración.**

Se aplicaron las cargas de peso propio de los elementos, las cargas vivas en función del área tributaria y cargas laterales arbitrarias debidas al sismo.

Como se puede observar en la imagen 19, el costo de la estructura convergió a la zona de costos óptimos alrededor del tercer o cuarto ciclo de análisis, o sea, luego de 150-200 análisis realizados.



**Figura 18. Gráfica de costo de materiales (en pesos) vs ciclo de iteraciones.**

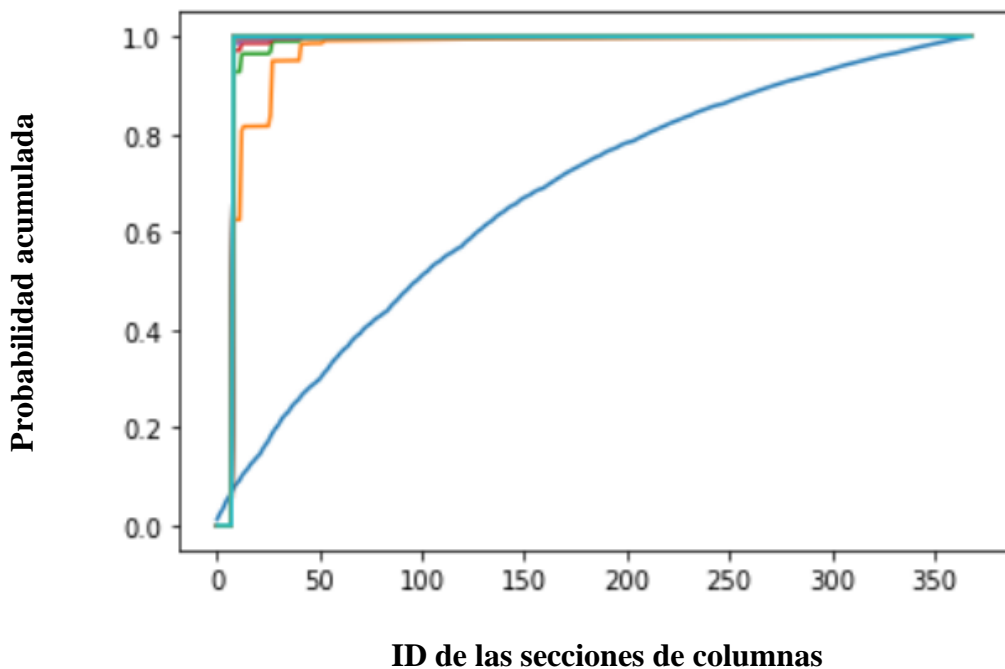
El algoritmo tiende a seleccionar para este problema las secciones con pequeños ID, que corresponden a las secciones más pequeñas, como era de esperarse, y como se puede comprobar mediante un análisis y revisión estructural independiente.

La convergencia es posible porque tras cada ciclo de análisis, las 20 mejores hormigas de las 50 que participan en el ciclo depositan feromona en función de la calidad de la solución que obtuvieron. En la primera iteración, las hormigas seleccionan secciones basándose puramente



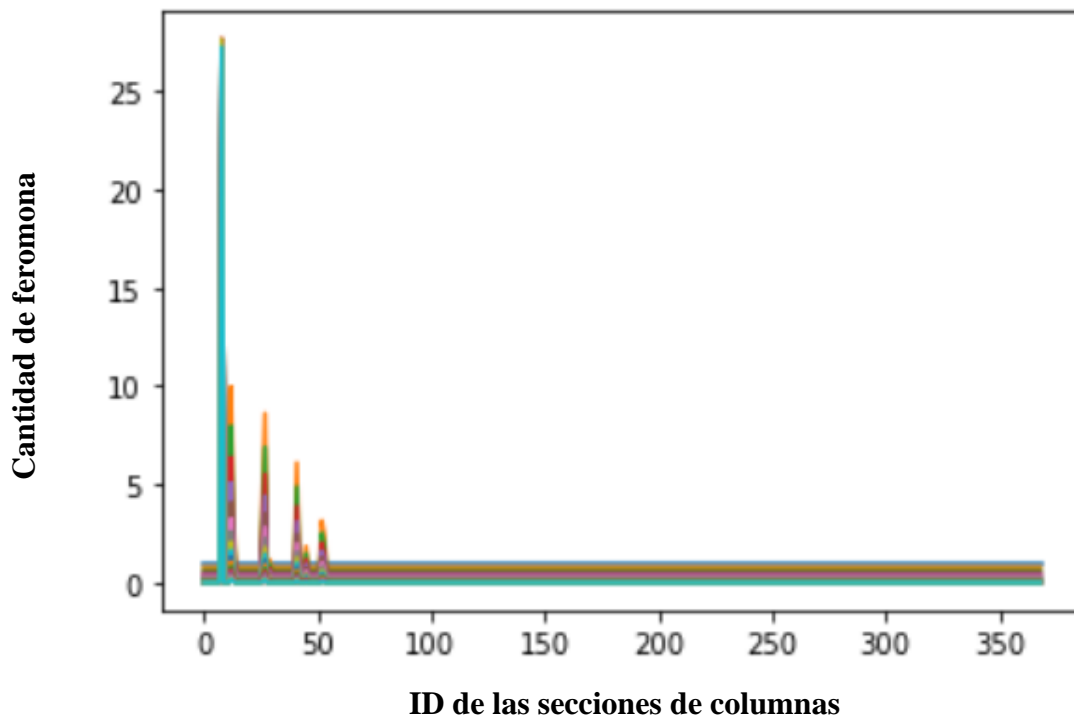
en los costos de las secciones, dado que la matriz de feromonas comienza con valores unitarios. Tras el ciclo de análisis, la sección. Una solución barata pero que no cumple con comprobaciones de resistencia se convierte en una solución cara, de manera que las hormigas que escojan esas secciones no podrán depositar feromona, dado que se quedarían fuera de la regla de actualización.

En la figura 20, se muestra la evolución la probabilidad de ser escogida. Se puede ver que al comienzo (línea azul) hay una probabilidad un poco más distribuida entre todas las secciones, aunque favoreciendo a las secciones más pequeñas (el 50% de la probabilidad recaen en el primer 30% de las secciones). A medida que van avanzando los ciclos (línea naranja, luego verde, luego roja), la probabilidad acumulada va sesgándose hacia las secciones más pequeñas, como es de esperarse.



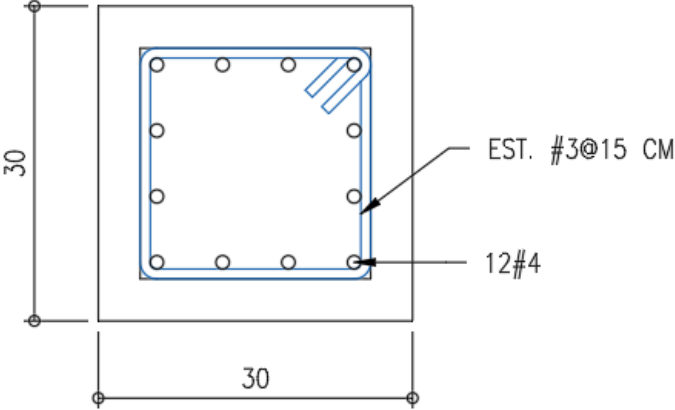
**Figura 19. Gráfica de la probabilidad acumulada de las secciones de las columnas.**

En la figura 21, se muestran las cantidades de feromona individuales de cada sección al finalizar los ciclos de análisis.

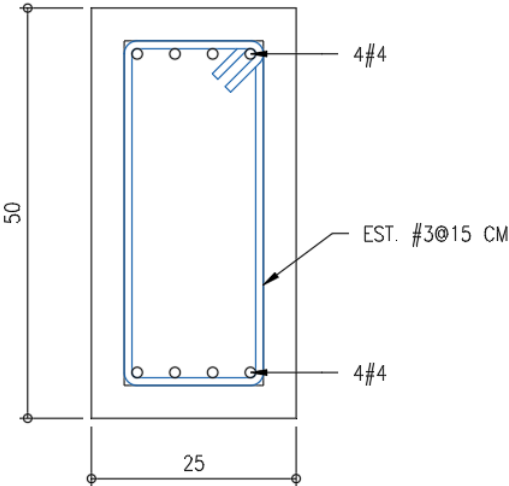


**Figura 20. Gráfica de la cantidad de feromona al finalizar la aplicación del método.**

La solución para este problema consistió en las columnas de 30x30 cm, y vigas de 25x50 cm, con los armados que se muestran en la figura 22.



**Figura 21. Secciones de columnas obtenidas por el algoritmo de colonias de hormigas para el marco de concreto reforzado de un nivel.**



**Figura 22. Secciones de vigas obtenidas por el algoritmo de colonias de hormigas para el marco de concreto reforzado de un nivel.**

## SEGUNDO EJERCICIO DE CALIBRACIÓN

Este ejercicio se realizó en las primeras etapas de este trabajo, en los momentos en los que se estaba estableciendo la metodología. Sirvió como base para comparar la implementación versus lo publicado en los artículos académicos [24].

El problema consistió en el diseño de una armadura encontrada en la bibliografía, en la que se buscaba minimizar el peso de la estructura para las secciones que cumplieran con que el esfuerzo debido a las fuerzas axiales fuera menor que el esfuerzo de fluencia del acero seleccionado. La armadura modelada y la gráfica de volumen de acero se presentan en las figuras 24 y 25, respectivamente.

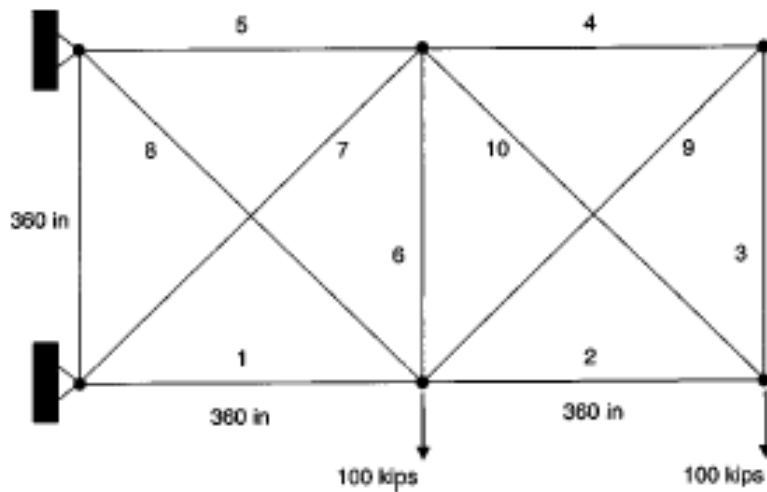
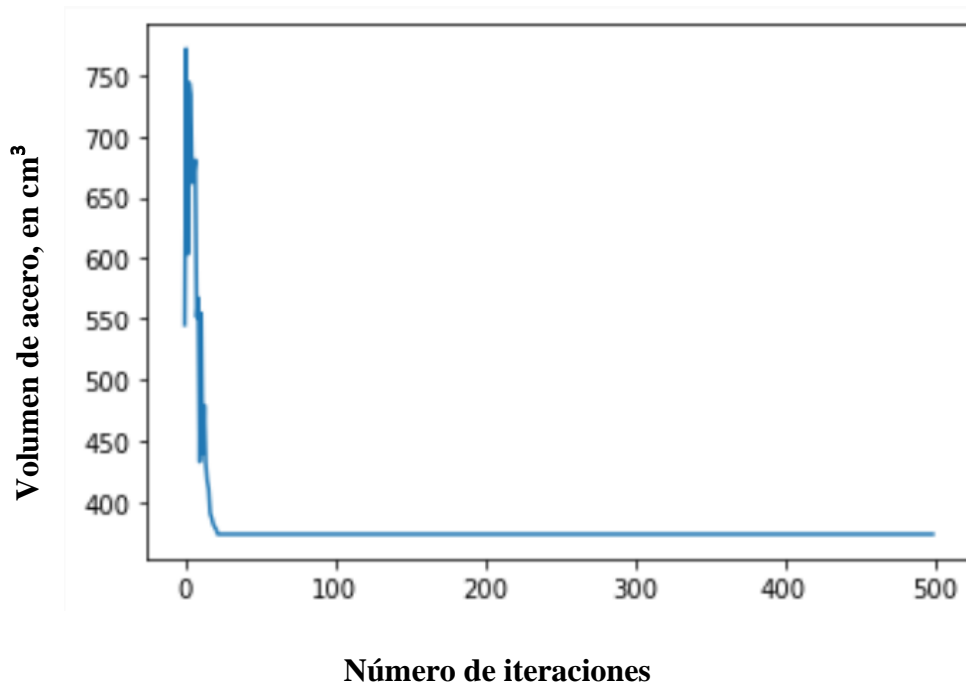


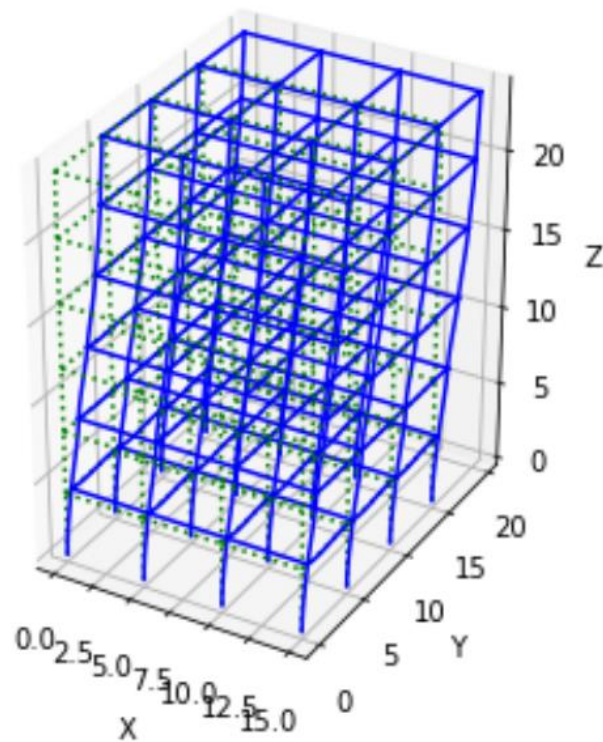
Figura 23. Modelo de armadura, tomado de [24]



**Figura 24. Volumen de acero vs número de iteración (eje horizontal).**

## MODELO DE ESTUDIO

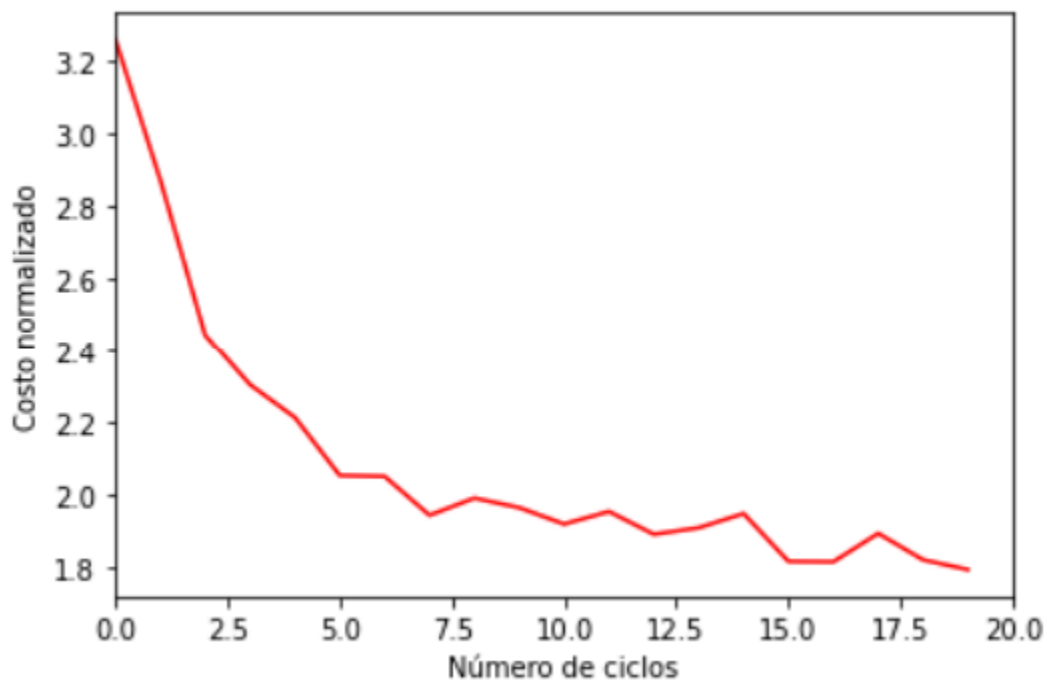
El modelo de estudio consistió en un edificio de 6 niveles, de 3 m por nivel, dando una altura total de 18 m. En la figura 16 se muestra la planta y elevación de dicho edificio, y en la figura 26 se muestra el modelo tridimensional generado en Opensees. La altura del modelo se restringió de manera que se pudiera aplicar el método estático para el análisis sísmico. Los tamaños de los tableros se seleccionaron de manera que se trate de representar un edificio típico de oficinas de la región del noroeste de México. La distancia entre columnas es de 5 m.



**Figura 25. Modelo 3D generado en Opensees (cotas en m).**

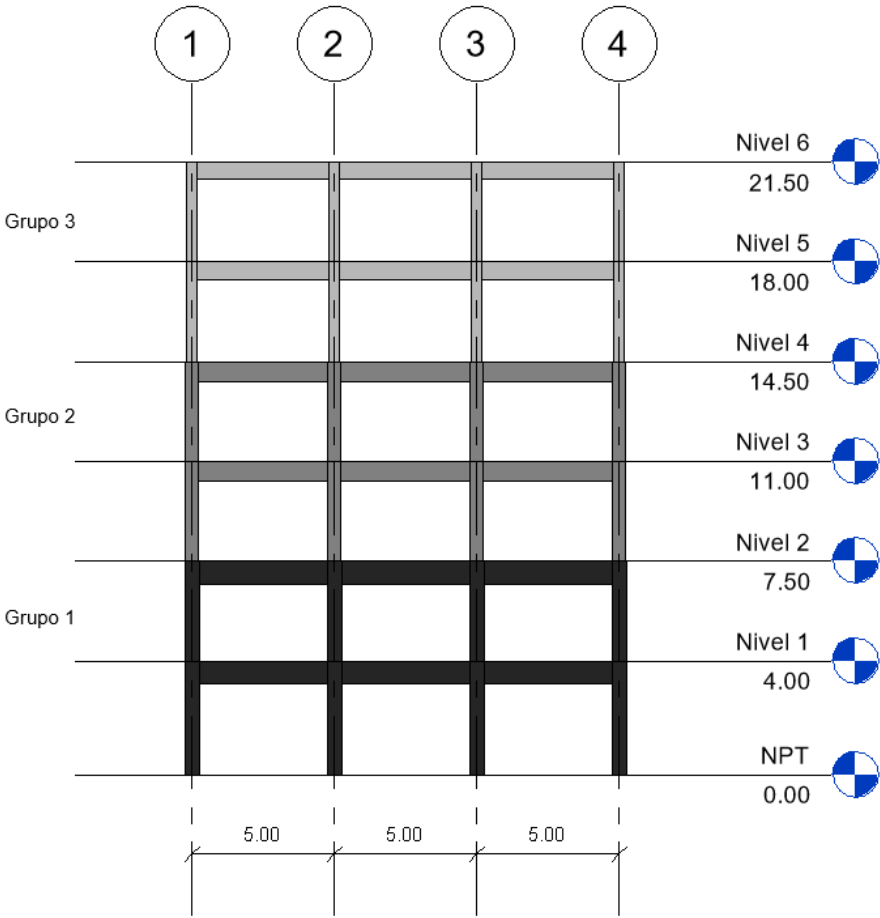
Con la metodología se obtienen gráficas del tipo mostrado en la figura 27. Cada ciclo de análisis que se muestra en el eje horizontal representa 40 análisis estructurales. Graficados en el eje vertical se encuentra el costo promedio de los análisis del ciclo, normalizados respecto al menor costo posible obtenible utilizando los perfiles más pequeños de la base de datos. Se puede observar que en los primeros 5 ciclos (200 análisis) hay una disminución del 37.5% respecto a los ciclos de análisis iniciales. La tendencia general a través de los ciclos es a la baja, y en la gráfica se presentan hasta los primeros 20 ciclos.

El costo presentado está normalizado respecto al menor de los costos posibles generados con la base de datos (sin tomar en cuenta las restricciones de resistencia), que tiene un valor de \$1,450,083 pesos.



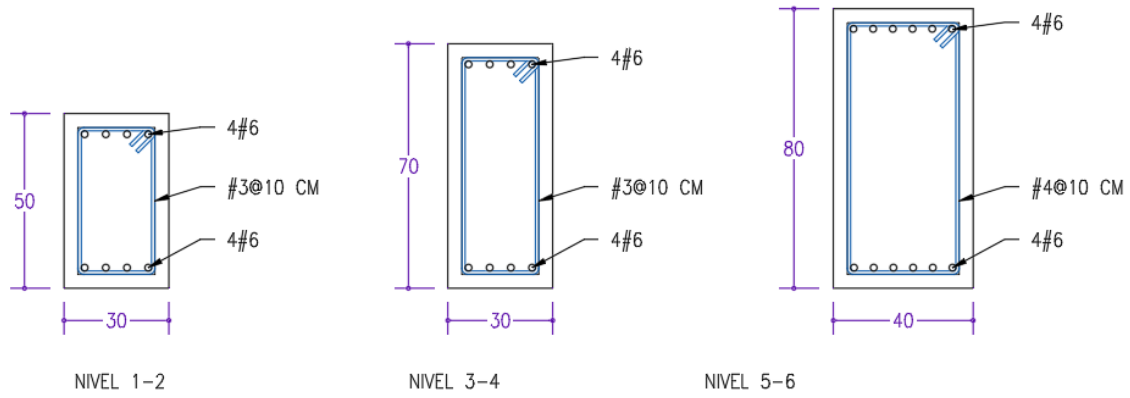
**Figura 26. Evolución de los costos de la estructura vs el número de ciclo de análisis.**

Por su naturaleza aleatoria y probabilística, la metodología de colonia de hormigas no produce una combinación de secciones iguales en cada corrida. Aquí se presentan las secciones obtenidas para la iteración que corresponde con la gráfica de costos, haciendo mención que

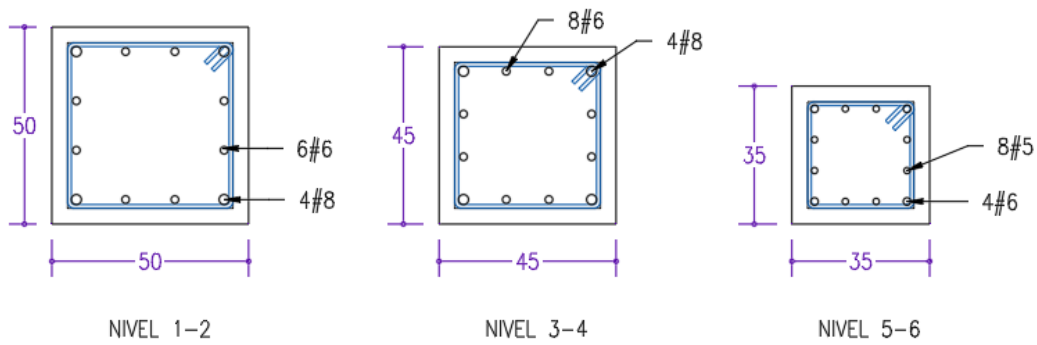


**Figura 27. Elevación del edificio con las secciones del método de colonia de hormigas.**





**Figura 28. Secciones de vigas obtenidas tras las iteraciones del método.**



**Figura 29. Secciones de columnas obtenidas tras las iteraciones del método.**

## 8. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ACO: DISCUSIÓN

### Uso del conocimiento que se tiene en la práctica

En el presente trabajo no se utilizó información inicial que diera preferencia a ciertas secciones sobre otras, por lo que las matrices de feromona comenzaron en valores unitarios; sin embargo, el método ACO permite comenzar el análisis con información inicial, que refleja las preferencias hacia ciertas secciones. Esta información, si es confiable, ayudaría a reducir el número de ciclos de análisis necesarios para alcanzar una solución satisfactoria, o, manteniendo el número de ciclos, permitiría explorar a más detalle regiones del espacio solución para afinar más la exploración.

Esta información se tendría que introducir tomando en cuenta la naturaleza probabilística y aleatoria de las matrices de decisión. Por ejemplo, no se debería introducir un valor alto de feromona solo a una sección en particular, sino que se deberían introducir por regiones, dada la manera en la que la metodología escoge secciones. Por ejemplo, si una sección de concreto de 40x40 cm y con 30 cm<sup>2</sup> de acero es adecuada, secciones de 40x40 cm y 28, 32, 34, 35 o 38 cm<sup>2</sup> de acero también serían adecuadas, y buen punto de partida para concentrar sobre estas secciones la búsqueda de la solución. Hay que asignar valores de feromona a las secciones deseadas de manera que se genere una sección de exploración.

## **Tipo de restricciones que acepta el método**

En este trabajo se contemplaron restricciones para comprobaciones de estados límites de falla y de servicio, y comprobaciones de compatibilidad (anchos de vigas menores a anchos de columnas, anchos de columnas de pisos superiores menores a columnas de pisos inferiores, etc.).

En la metodología ACO se puede agregar cualquier número de restricciones que se consideren necesarias, siempre y cuando estas se puedan expresar numéricamente, y se expresen de forma adimensional (por ejemplo, el número de veces que cierta medición excede cierta comprobación), y que el número total de estas medidas denominadas violaciones esté normalizado respecto al número total de comprobaciones que se estén realizando. Esto debido a que se tiene que arribar al final del procedimiento a una medida significativa respecto a la idoneidad de una solución.

Un valor de las violaciones normalizado de 1.00 significaría que en todas las comprobaciones de todos los elementos se están excediendo en un 100% (o es lo mismo decir el doble). Tal violación indicaría un resultado muy inadecuado. Un valor normalizado de 0.03 significaría que todas las comprobaciones se exceden en un 3%. En este caso, aunque el método haya fallado al determinar una solución que cumpliera con todas las violaciones (puesto que el valor no es 0.00), un valor de 0.03 sería más fácil de corregir manualmente que uno de 1.00.

Se puede indicar además una importancia relativa de un tipo de comprobación respecto a otra afectando cada violación por un parámetro de importancia. De esta manera, podríamos tener comprobaciones altamente indeseables, de manera que aún valores pequeños de violación, 0.01 por ejemplo, se magnifiquen. Un ejemplo de esta ponderación es el de la compatibilidad

en los anchos de las columnas de un nivel a otro: puede que se dé el caso en que la columna superior sea de 35 cm y la inferior de 30 cm, y la medida de la violación se tome como la diferencia de ambos anchos entre el ancho menor,  $5/30 = 16\%$ , este 16% no se puede corregir en el diseño final sin cambiar el ancho de los elementos, cambiando con esto los elementos mecánicos del análisis e invalidándolo. Pero un error en el acero necesario vs el suministrado de 16% podría implicar solo agregar unos bastones adicionales de acero, sin modificar los elementos mecánicos.

### **Respecto a la complejidad numérica**

En este trabajo se modeló el edificio como un sistema de marcos tridimensionales a base de columnas y vigas. No se consideró el análisis de un sistema de losa o de muros

Los tiempos para cada análisis independiente, incluyendo las comprobaciones, ronda en los 5 segundos en un equipo con procesador Intel i5 de 11va generación, 16 GB de memoria RAM, y almacenamiento en estado sólido M2. Este tiempo de análisis se repetía para las 40 hormigas por ciclo utilizadas, para los 40 ciclos escogidos en el peor de los escenarios, dando un tiempo total de 2 horas aproximadamente.

Este tiempo debe tomarse en cuenta, puesto que se multiplicaría para un tipo de problema nuevo en el que se desee explorar con nuevos parámetros para evaluar las matrices de feromona y para las funciones de penalización.

Identificar los elementos que pueden diseñarse o pre-dimensionarse independientemente reduce en gran medida la complejidad del problema, y favorece los tiempos de cálculo, permitiendo realizar un número de análisis adecuado en un tiempo razonable para arribar a una solución aceptable.

También sería aceptable evaluar primero con modelos simplificados para losas y muros (como métodos de columna ancha o puntal tensor) para los casos en los que sea necesario modelar estos elementos, dado que en la práctica común estos elementos se discretizan con un elevado número de nodos, aumentando la complejidad de la matriz de rigideces que se tendrá que resolver.

### **Parámetros de calibración**

En este trabajo se tuvieron que establecer valores para los parámetros que intervienen. Estos parámetros se utilizan en varias partes del proceso. Se enlistan a continuación.

#### ***Factores $\alpha$ y $\beta$***

El factor  $\beta$  es el exponente del parámetro que mide el valor del parámetro heurístico del problema, que es el que se aprovecha del conocimiento que se tiene del modelo que se está trabajando. En el caso del diseño estructural este parámetro se seleccionó como el inverso del costo de la sección, de manera que al seleccionar alguna sección para algún elemento las secciones con menor costo tiendan a ser favorecidas, dado que lo que se intenta es minimizar el costo de la estructura.

El factor  $\alpha$  es el exponente del parámetro que controla el valor de la feromona para alguna sección. Trabajando en conjunto con el parámetro heurístico, se escoge una sección que tome en cuenta tanto el costo de la sección como su historia previa. Por ejemplo, una sección barata en costo de materiales, pero que no cumpla con las comprobaciones de resistencia, no tendrá un valor alto de feromona, mientras que una sección que podría ser cara en cuanto al costo de materiales pero que cumpla con todas las comprobaciones y por ende no sea castigada por

factores de penalización, sería una solución deseable. Esta idoneidad se guarda en la matriz de feromonas de las secciones.

Para este trabajo se encontró que los valores de  $\alpha = 3$  y  $\beta = 2$  resultaban adecuados, dado que estos parámetros permitían una exploración de las secciones y no convergían con demasiada prontitud a ciertas secciones.

El parámetro de feromona, que es el parámetro que en realidad mide el desempeño de las secciones tras ejecutar el análisis completo, es el parámetro que podría aumentarse para tratar de ajustar la convergencia del método, pero con reserva, dado que una convergencia temprana no es la finalidad de un análisis, sino la convergencia a una solución de bajo costo.

### **Factores de la función de penalización**

La función de penalización castiga a las soluciones que no cumplen con las restricciones impuestas. Toman el valor normalizado de las violaciones,  $v$ , y obtienen un valor  $fp$  que multiplicará al costo de los materiales de la solución obtenida.

Para este problema, el rango de costos normalizados respecto a un costo mínimo posible (tomando como solución las secciones de menor costo para cada elemento) varía entre 1 y 22. Por lo tanto, el factor de penalización debería penalizar de manera que ubique a un modelo respecto a estos rangos de una manera responsable.

Por ejemplo, una sección que no cumpla con muchas de las comprobaciones, pero que conduzca a un factor de penalización de 2, no reflejaría adecuadamente la no idoneidad. Una solución fuertemente indeseable debería arrojar un costo penalizado igual o mayor al mayor costo posible, en este caso, 22.

Una sección que cumpla con la mayoría de las comprobaciones pero que se exceda en algunas, podría tener un factor de penalización entre 1 y 3, esto para no castigar demasiado a las secciones que sí resultaron adecuadas.

La expresión para la función de penalización es:

$$f_p = (1 + \gamma * v)^\omega$$

En donde  $v$  es la violación del problema, y  $\omega$  y  $\gamma$  controlan la magnitud e importancia de las violaciones.

En este trabajo se seleccionó un valor de  $\gamma = 10$  y  $\omega = 2.0$ . Estos valores cumplen con los requisitos expuestos anteriormente.

## 9. CONCLUSIONES

En este trabajo, se implementó el algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas para un problema de ingeniería sísmica aplicado a edificios de concreto reforzado. Para ello, se desarrolló un programa de cómputo capaz de diseñar edificios de concreto reforzado a través del algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas. Es importante mencionar que en el presente estudio se buscó minimizar el costo total estructural, cumpliendo con los requerimientos del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. Los resultados muestran el potencial de la técnica de Optimización por Colonia de Hormigas como herramienta para el diseño sísmico óptimo de edificios de concreto reforzado.

De los resultados del trabajo se concluye lo siguiente:

### *Respecto al hallazgo de soluciones*

- El programa es capaz de encontrar soluciones económicas al finalizar las iteraciones. El cambio notable comienza a observarse tras los primeros ciclos del método, en los que la matriz de feromonas ya tiene información resultado de una exploración de las hormigas.
- El número de cálculos necesarios para comenzar a disminuir el costo de la estructura se encuentra en el intervalo de 200 análisis, agrupados en ciclos de 40 análisis por ciclo.
- A través de la calibración de los parámetros indicados en el capítulo 8 se puede ajustar la caída de la función de costo para cada problema en específico.



- Es importante mencionar que en cada corrida el programa de cómputo ofrece resultados diferentes debido a que el método se basa en reglas probabilísticas, pero que en general indica soluciones similares.

#### *Respecto a la implementación práctica*

- La geometría se puede exportar fácilmente de programas comerciales, como SAP, ETABS y similares.
- Las agrupaciones de elementos es una parte vital para reducir el número de variantes del problema, y con ello, el tiempo de ejecución del mismo. Este paso depende del criterio del ingeniero calculista, y se debe basar en consideraciones prácticas, tomando en cuenta también la necesidad de reducir los tiempos de cálculo.
- Los resultados obtenidos son de fácil interpretación.
- Siempre se puede utilizar el método comenzando con información que se tenga de la práctica, como secciones deseadas. Esto se logra alimentando la matriz de feromonas inicial de manera que favorezca ligeramente las secciones deseables por el usuario, y explore con mayor profundidad estas regiones.

#### *Mejoras a la metodología ACO utilizada*

- El método analiza globalmente la calidad de la solución, tal como se implementó en el presente trabajo. Se juzga la calidad del combinado de elementos, mas no los elementos individuales en ciertas posiciones. De manera que, aunque un elemento sea adecuado “localmente”, si forma parte de una combinación de elementos que en otra parte no cumpla con las restricciones establecidas y genere un valor de la violación

importante, recibirá una mala calificación, por ello, no será favorecida en los ciclos de análisis posteriores en principio; aunque la naturaleza aleatoria de selección y la evaporación de feromona son dos mecanismos que propician que la sección pueda ser escogida de nuevo al olvidar y emparejar los resultados a medida que avanza el método. Los parámetros que rigen la evaporización son muy importantes en la rapidez de convergencia.

- Existen modificaciones al método, que combinan las búsquedas con optimizaciones locales, de manera que se generen mejores soluciones en tiempos aún menores. El estudio de esas modificaciones al método ACO quedó fuera de este trabajo, pero son la continuación natural.

## 10.REFERENCIAS

- [1] Vitruvius, *The Ten Books on Architecture*, Dover Publications, 1960.
- [2] S. Timoshenko, *History of Strength of Materials*, Nueva York: Dover Publications, 1983.
- [3] A. Felippa, «A Historical Outline of Matrix Structural Analysis: A Play in Three Acts,» *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 1313-1324, 2001.
- [4] M. Dorigo y G. Di Caro, «Ant Colony Optimization: A New Metaheuristic,» pp. 1470-1477, 1999.
- [5] Z. S. H. y J. R. Evans, «Heuristic "Optimizaiton": Why, When, and How to Use It,» *INTERFACES*, vol. 11, n° 5, p. 84, 1981.
- [6] M. Dorigo, *Ant Colony Optimization*, Cambridge, Massachussets: The MIT Press, 2004.
- [7] M. Barraza, E. Bojórquez y E. R.-S. A. Fernández González, «Multi-objective optimization of structural steel buildings under earthquake loads using NSGA-II and PSO,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, n° 21, pp. 488-500, 2017.
- [8] C. Chisari y C. Bedon, «Multi-Objective Optimization of FRP Jackets for Improving the Seismic Response of Reinforced Concrete Frames,» *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 9, n° 3, pp. 669-679, 2016.
- [9] O. K. Erol y I. Eksin, «A new optimization method: Big Bang–Big Crunch,» *Advances in Engineering Software*, vol. 37, n° 2, pp. 106-111, 2003.
- [10] H. A. Leyva y E. Bojórquez, «Earthquake Desing of Reinforced Concrete Buildings Using NSGA-II,» *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, p. 11, 2018.
- [11] H. M. H. F. L. Nguyen, «Optimizing ANN models with PSO for predicting short building seismic response,» *Engineering with Computers*, vol. 36, pp. 823-837, 2020.

- [12] J. Kennedy y R. Eberthart, «Particle swarm optimization,» *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.
- [13] D. Martens, M. De Backer y R. Haesen, «Classification With Ant Colony Optimization,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11, n° 5, pp. 651-665, 2007.
- [14] M. Dorigo y C. Blum, «Ant Colony Optimization Theory: A Survey,» *Theoretical Computer Science*, vol. 344, pp. 243-278, 2005.
- [15] A. Kaveh, «A Hybrid Particle Swarm and Ant Colony Optimization for Desing of Truss Structures,» *Asian Journal of Engineering (Building and Housing)*, vol. 9, n° 4, pp. 329-348, 2008.
- [16] J. A. Bland, «Optimal Structural Desing by Ant Colony Optimization,» *Engineering Optimization*, vol. 33, n° 4, pp. 425-443, 2007.
- [17] A. Kaveh, «Performance-based Seismic Desing of Steel Frames Using Ant Colony Optimization,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, n° 4, pp. 566-574, 2010.
- [18] I. Aydogdu, «Ant Colony Optimization of Irregular Steel Frames Including Elemental Warping Effect,» *Advances in Engineering Software*, vol. 44, n° 1, pp. 150-169, 2012.
- [19] X. Chuanhua, G. Behrouz y K. Mohammadreza, «Improving Performance of Retaining Walls Under Dynamic Conditions Developing an Optimized ANN Based on Ant Colony Optimization,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94692-94700, 2019.
- [20] F. Martínez y F. González, «Design of Tall Bridge Piers by Ant Colony Optimization,» *Engineering Structures*, vol. 33, n° 8, pp. 2320-2329, 2011.
- [21] A. Kaveh y S. Talatahari, «An Improved Ant Colony Optimization for Constrained Engineering Desing Problems,» *Engineering Computations*, vol. 27, n° 1, pp. 155-182, 2010.

- [22] S. Thomas, «Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach,» *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 134, n° 9, 2008.
- [23] J. Denebourg, «The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant,» *Journal of Insect Behaviour*, vol. 3, pp. 159-168, 1990.
- [24] Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, CDMX, 2017.
- [25] M. Dorigo, «Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 26, n° 1, pp. 29-41, 1996.
- [26] L. Guan-Chun, «Structural Topology Optimization Using Ant Colony Optimization Algorithm,» *Applied Soft Computing*, vol. 9, n° 4, pp. 1343-1353, 2009.
- [27] B. Chandra Mohan, «A Survey: Ant Colony Optimization Based Recent Research and Implementation on Several Engineering Domain,» *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 4, pp. 4618-4627, 2012.
- [28] Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, CDMX, 2020.
- [29] A. Kaveh y S. Shojaee, «Optimal Design of Skeletal Structures Using Ant Colony Optimization,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 70, pp. 563-581, 2007.
- [30] J. MacGregor y J. Wight, *Reinforced Concrete, Mechanics and Design*, New Jersey: Pearson, 2005.