

# Optimization of the design of a steel fiber reinforced concrete portal frame using the metaheuristic Simulated Annealing algorithm

Josue Oswaldo Mendiburu-Alván<sup>1</sup>, Sarita Mariela Pizán-García<sup>1</sup>, Eduardo Manuel Noriega-Vidal, Msc.<sup>1</sup>, Juan Carlos Martell-Ortiz, Msc.<sup>1</sup>, Alex Arquímedes Herrera-Viloché, Dr.<sup>1</sup>, Eduar Jose Rodriguez-Beltran, Msc.<sup>1</sup>, [jomendiburu@ucvvirtual.edu.pe](mailto:jomendiburu@ucvvirtual.edu.pe), [spizang@ucvvirtual.edu.pe](mailto:spizang@ucvvirtual.edu.pe), [enoriega@ucv.edu.pe](mailto:enoriega@ucv.edu.pe), [jmartellor@ucvvirtual.edu.pe](mailto:jmartellor@ucvvirtual.edu.pe), [aherrerav@ucv.edu.pe](mailto:aherrerav@ucv.edu.pe), [erodriguezb@ucv.edu.pe](mailto:erodriguezb@ucv.edu.pe),

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo, Perú

*Abstract- The objective of this research was to optimize the design of a steel fiber reinforced concrete portal frame using the Simulated Annealing algorithm. The methodology was basic, non-experimental, and simple descriptive, using Excel to collect initial data. After 14,000 iterations of the algorithm, an optimal design with two 40 x 40 cm columns and a 25 x 40 cm cant beam was identified. The steel rods were 1.25% for the columns and 1% for the beams, with steel fibers added at a rate of 20 kg/m<sup>3</sup>. This allowed optimizing the total cost to S/. 1236.32 soles, reducing the initial estimated cost by 67.68%, not including labor costs. In conclusion, the application of the Simulated Annealing algorithm achieved an efficient and cost-effective design of the steel fiber reinforced concrete portal frame. The final design met the required geometric and strength specifications, validating the results with ETABS analysis. Demonstrating that metaheuristic optimization is an effective tool for the design of steel fiber reinforced concrete frames.*

*Keywords: Optimization, Reinforced concrete portal frame, Simulated Annealing, Cost*

# Optimization of the design of a steel fiber reinforced concrete portal frame using the metaheuristic Simulated Annealing algorithm

Josue Oswaldo Mendiburu-Alván<sup>1</sup>, Sarita Mariela Pizán-García<sup>1</sup>, Eduardo Manuel Noriega-Vidal, Msc.<sup>1</sup>, Juan Carlos Martell-Ortiz, Msc.<sup>1</sup>, Alex Arquímedes Herrera-Viloche, Dr.<sup>1</sup>, Eduar Jose Rodriguez-Beltran, Msc.<sup>1</sup>, jomendiburu@ucvvirtual.edu.pe, spizang@ucvvirtual.edu.pe, enoriega@ucv.edu.pe, jmartellor@ucvvirtual.edu.pe, aherrerav@ucv.edu.pe, erodriguezb@ucv.edu.pe,

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo, Perú

**Resumen-** El objetivo de esta investigación fue optimizar el diseño de un pórtico de hormigón reforzado con fibras de acero utilizando el algoritmo Simulated Annealing. La metodología fue básica, no experimental y descriptiva simple, utilizando Excel para recoger los datos iniciales. Tras 14.000 iteraciones del algoritmo, se identificó un diseño óptimo con dos columnas de 40 x 40 cm y una viga peraltada de 25 x 40 cm. Las barras de acero fueron del 1,25% para las columnas y del 1% para las vigas, con fibras de acero añadidas a razón de 20 kg/m<sup>3</sup>. Esto permitió optimizar el costo total a S/. 1236.32 soles, reduciendo el costo inicial estimado en 67.68%, sin incluir los costos de mano de obra. En conclusión, la aplicación del algoritmo de Recocido Simulado logró un diseño eficiente y rentable del pórtico de concreto reforzado con fibras de acero. El diseño final cumplió las especificaciones geométricas y de resistencia requeridas, validando los resultados con el análisis ETABS. Demostrando que la optimización metaheurística es una herramienta eficaz para el diseño de pórticos de hormigón reforzado con fibras de acero.

**Palabras clave:** Optimización, Pórtico de hormigón armado, Recocido Simulado, Costos

## I. INTRODUCCION

Anteriormente, era necesario corregir con frecuencia los valores de algunas propiedades estructurales sin modificar otras para cumplir los parámetros deseados de la distribución estructural en un pórtico de hormigón armado. Este proceso se repetía, lo que impedía optimizar el diseño, el coste y el tiempo. Tal procedimiento se encontraba condicionado al análisis de diversas posibles soluciones basadas en el propio juicio del profesional estructuralista, sin saber con exactitud la solución óptima. Sin embargo, con el transcurso del tiempo nuevos métodos surgieron para realizar el diseño estructural de manera eficaz. Cada uno de estos métodos era mejor que el anterior, puesto que, ofrecía mejores

resultados al momento de realizar los cálculos, optimizando el diseño en función del tiempo y costo. Actualmente contamos con métodos que, a través de la tecnología, mejoran las herramientas computacionales que favorecen a la optimización de pequeñas y grandes estructuras.

De este modo [1], sostuvo que se da paso a procesos iterativos de modificación de la estructura en los que se investiga toda la gama de combinaciones de variables de diseño que repercuten en la estructura y satisfacen las condiciones deseadas, garantizando que el diseño final se ajuste al diseño óptimo y que su búsqueda está libre del juicio subjetivo del profesional encargado del diseño.

Lo cual en la actualidad se busca que todo diseño estructural se encuentre en equilibrio con su costo, es decir, optimizar los procedimientos de diseño constructivos y costos totales para conseguir la sostenibilidad del proyecto. Por este motivo, el Predimensionamiento (considerado como proceso de definición de las posibles dimensiones con sus respectivos materiales de los elementos estructurales) es la etapa inicial del método utilizado actualmente para desarrollar un pórtico de hormigón armado. Posteriormente, se utilizan constantes de modelado mecánico que incluyen geometría, condición de apoyo, material, masa y cargas; a partir de ello, se crea el modelo de la estructura.

De manera que [2], manifestaron que el análisis estructural, nos permite obtener resultados óptimos siguiendo los parámetros establecidos por la normativa vigente como el Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma E 020, Norma E 030, Norma E 060.

Teniendo en cuenta que, para lograr la optimización del diseño estructural de un pórtico de hormigón armado con fibras de acero, se requiere de un análisis minucioso

y se plantea el siguiente problema: ¿Cuál es la Optimización del diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing? De este modo, el proyecto busca aplicar mediante la unificación de algoritmos metaheurísticos la optimización del diseño del pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero aplicando la Inteligencia Artificial (IA).

Según [3] expresaron que se logró optimizar en gran manera el peso total por unidad de longitud de la estructura de contención según el método ACI 318-05. Para ello, utilizaron dos libros de referencia con cambios continuos para la geometría de la pared y diferentes cambios para el refuerzo de acero para optimizar el diseño. Finalmente, los valores numéricos obtenidos en la medición, la media de los pesos y la desviación estándar muestran la precisión, potencia y flexibilidad de ASAM para resolver diferentes tipos de problemas, y el diferente número de cambios, con lo que se logra que sea un método efectivo y seguro.

Por otra parte [4], plantearon una optimización económica del hormigón armado prefabricado usado en el diseño de un marco articulado, donde utilizaron un algoritmo híbrido de recocido simulado y un operador de mutación, lo que hizo posible que obtenga diseños con costes limitados usando un óptimo de materiales. Antes de realizar la optimización de la estructura, se realizó la verificación de los estados límite último (ELU), de servicio (ELS) y el cálculo estructural a través del desarrollo de un software propio.

Así mismo [5], lograron reducir el tiempo de cálculo y obtener mejores resultados en el diseño de un muro de contrafuerte. Para ello, aplicaron el diseño del ensayo observacional para ajustar los parámetros del algoritmo de Simulated Annealing (SA) del muro de contención con zapata, de 11 m de altura. Este estudio permitió crear un método para obtener los elementos principales que muestran mejores resultados para el mismo propósito, aplicados al muro contrafuerte. Cabe mencionar que la reducción de costos de diseño está asociada a la reducción del consumo de materiales, lo que conlleva a una mejora ambiental.

De esta manera [6], expresaron que al realizar la optimización de estructuras de hormigón armado no solo estamos favoreciendo a la reducción de costos del diseño, sino que indirectamente se obtienen estructuras más amigables con el medio ambiente. Debido a que el hormigón, así como ha traído beneficios también ha traído consecuencias negativas para el medio ambiente, pues es, el segundo material más usado en el planeta y cuya producción genera entre el 4% y el 8% del dióxido de carbono mundial.

Mientras que [7] identificaron la opción más accesible y asequible para la comunidad y al mismo tiempo eliminar la opción menos viable, donde determinaron el modelo estructural más sismorresistente y rentable para la construcción de viviendas en el

Ecuador. Actualmente, el método de construcción predominante en el país utiliza marcos de hormigón armado, que pueden no proporcionar suficiente protección contra la actividad sísmica. Los resultados presentan que para evaluar la integridad estructural se utilizan programas de análisis estructural como SAP 2000, ETABS, SAFE, etc. lo que permitirá una comparación de derivas y desplazamientos a medida que el corte basal aumenta progresivamente hasta el límite de capacidad final para cada casa. Además, se realiza un análisis económico mediante la elaboración de un presupuesto de la superestructura de cada casa utilizando ambos métodos de construcción.

Además [8] desarrollaron por medio de redes neuronales artificiales como una forma de inteligencia artificial con el objetivo de reducir el costo del hormigón armado. Se usó este algoritmo de aproximación no lineal con el objetivo de mejorar las secciones de los muros de corte de edificaciones sin irregularidad de 6 niveles en el distrito de Miraflores-Perú. Se utilizó el software ETABS como herramienta de análisis estructural, la elaboración de la red neuronal se llevó a cabo en Matlab porque es un programa especializado en el trabajo con matrices y finalmente para el diseño y almacenamiento de información se usaron Mathcad y Excel. Para el análisis se diseñaron 10 redes neuronales diferentes, con el objetivo de seleccionar la que mejor se ajuste a los datos utilizados para el entrenamiento. El ancho y el largo de la casa se ingresaron como variables de entrada; y la distancia entre luz máxima de los ejes X e Y, como variable de salida. Sin embargo, en cada uno de ellos el número de neuronas y el número de capas ocultas son diferentes. En el proceso de entrenamiento se utilizan 30 casos con las dimensiones optimizadas, lo que permite a la red neuronal predecir la longitud y el espesor de la placa con un error del 10%.

De manera que [9] la aplicación de algoritmos heurísticos, metaheurísticos, así como la inteligencia artificial viene siendo implementada en las diferentes ramas de la ingeniería como también en el área de la salud, derecho, etc. Su implementación se debe principalmente a lograr la optimización en diferentes recursos como también en el proceso de interés. En física, matemáticas e ingeniería, es común que se requiera encontrar el valor óptimo global de funciones multidimensionales. Un ejemplo de método metaheurístico es el Recocido Simulado cuyo objetivo es dar solución a problemas de optimización global, aunque una de sus desventajas es que el tiempo de búsqueda puede ser infinito.

Adicionalmente [10] manifestó que la aplicación del algoritmo Simulado Recocido para determinar la optimización de vigas de hormigón armado. Para ello, se realizó el cálculo de optimización de 15602 vigas con una sección de 0,3 m x 1,40 m, con una resistencia a compresión de 280 kg/cm<sup>2</sup> y superficie de acero de 8,04 cm<sup>2</sup>. El coste resultante fue de s/. 1909.63 y se pudo completar la geometría de diversos modelos para su

análisis e implementación. Además, el autor menciona que la tecnología crea muchas oportunidades; como el estudio de la inteligencia artificial que permite automatizar tareas y procesos que antes solo podían realizar los seres humanos.

Finalmente, el objetivo general es Optimizar el diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing; en consecuencia, se ha planteado como objetivos específicos evaluar la cantidad óptima de fibras de acero en un pórtico de hormigón armado mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing, calcular el costo optimizado de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero, identificar la resistencia a la compresión optimizada de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing y analizar la optimización del diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de Acero en ETABS.

## II. METODOLOGIA

### A. Tipo de investigación

La investigación de tipo Básica permitiendo adquirir nuevos conocimientos teóricos mediante el uso de algoritmos metaheurísticos, sin el interés directo de contrastarlo con algún caso práctico. [12] En el estudio se tomó en cuenta una investigación Básica, por lo que hay conocimientos vinculados con el contenido y unas cuantas metodologías.

### B. Diseño de investigación

Según su diseño no experimental [13], es aquella metodología que está no busca hacer manipulación de las variables estudiadas por parte de los investigadores. También es manera descriptiva simple [14], ya que se hará la recolección de información, con el fin de analizar nuestras variables.

### C. Variables y operacionalización.

En la investigación científica, una variable independiente es aquella que se manipula o controla para observar su efecto sobre otras variables. En ese sentido, la variable independiente de la investigación era el diseño de un pórtico de hormigón armado. Dicho pórtico estaba reforzado con fibras de acero y su optimización se realizaba mediante un lenguaje de programación que incluía factores clave para determinar el porcentaje óptimo de fibras de acero, los costos optimizados y la resistencia a la compresión óptima. El diseño de vigas y columnas consideraba la combinación de cargas por flexión, torsión y corte. Para la variable independiente se tuvo en cuenta las siguientes dimensiones e indicadores: Fibras de acero (20 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup> y 40 kg/m<sup>3</sup>, Costos

(Costo Optimizado de un pórtico) y Resistencia a la compresión ( $f'c = F/A$ ).

En lo que respecta a la variable dependiente, no se incluía en la investigación porque el objetivo principal era optimizar el diseño estructural. La variable independiente (diseño del pórtico de hormigón armado) se ajustaba para encontrar la configuración óptima, mientras que las variables dependientes tradicionales, como la resistencia o el costo, se utilizaban como criterios de evaluación en el proceso de optimización, y no como variables a ser predichas o explicadas.

### D. Población.

La definición precisa de la población es fundamental, ya que determina el alcance y la validez de los resultados obtenidos; en ese sentido para la presente investigación en desarrollo se consideró como población cualquier tipo de pórtico de hormigón armado apto para ser analizado mediante el algoritmo Simulated Annealing.

- Criterio de inclusión: En este estudio se incluyó a los pórticos de hormigón armados reforzados con fibras de acero de un solo vano y de un solo nivel.

- Criterio de exclusión: Se excluyó los pórticos de cualquier otro material (acero, madera, etc.), pórticos sin fibras de acero, que tengan más de un vano y/o más de un nivel.

### E. Muestra

La muestra es un grupo seleccionado de la población total que se examina para hacer inferencias sobre el conjunto completo. Para nuestra investigación se consideró la elección de 14000 iteraciones en el análisis. Esta decisión se basó en los criterios establecidos por los investigadores, incluyendo la representatividad de la población y la precisión deseada de los resultados. Además, se consideraron limitaciones prácticas como el tiempo de procesamiento computacional necesario para el cálculo.

### F. Muestreo.

El muestreo utilizado en la investigación fue no probabilístico, un método en el que las muestras no se seleccionan al azar y no todas las unidades de la población tienen una probabilidad conocida de ser elegidas. En cambio, se eligen de manera intencional o según criterios específicos.

En la investigación, este enfoque se empleó para seleccionar los casos que se ajustaron a las condiciones específicas del análisis. Este método permitió evaluar de manera precisa y directa la optimización del diseño del pórtico, considerando las características particulares necesarias para el estudio.

G. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Para la recolección de datos en la presente investigación, se utilizó la técnica de observación para obtener resultados relevantes de la variable analizada. Esta estrategia permitió a los investigadores interpretar adecuadamente la realidad del problema, con el objetivo de obtener una comprensión concisa del fenómeno en estudio. El diseño del pórtico se procesó mediante el método Simulated Annealing, utilizando la información recabada a partir del proceso de observación.

Posteriormente, se empleó una ficha de validación, la cual fue revisada por tres expertos en el área. El procedimiento de investigación se llevó a cabo bajo criterios de diseño estructural, iniciando con la determinación de los valores de dimensionamiento de columnas y vigas, que, al unirse, forman un pórtico de hormigón armado al que se le añadió un porcentaje de fibras de acero para el análisis de resistencia a la compresión, ver Tabla II. El objetivo final fue obtener el diseño óptimo del pórtico utilizando el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing.

En la segunda etapa, los datos relevantes se ingresaron en una hoja de cálculo Excel para el análisis y diseño de la geometría del pórtico ver Tabla III, el recubrimiento de los elementos estructurales, la cantidad de acero en dichos elementos, el porcentaje recomendado de fibras de acero basado en estudios previos, y las resistencias a la compresión del hormigón armado, que fueron  $f_c = 210, 280, 350$  y  $420 \text{ kg/cm}^2$ . La fluencia del acero se mantuvo en  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ . Finalmente, se ejecutó el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing utilizando el lenguaje de programación Python, integrado en Microsoft Excel, considerando las dimensiones de columnas y vigas de hormigón armado, así como las resistencias a la compresión, la fluencia del acero corrugado y el porcentaje de fibras de acero, ver Fig. 1.

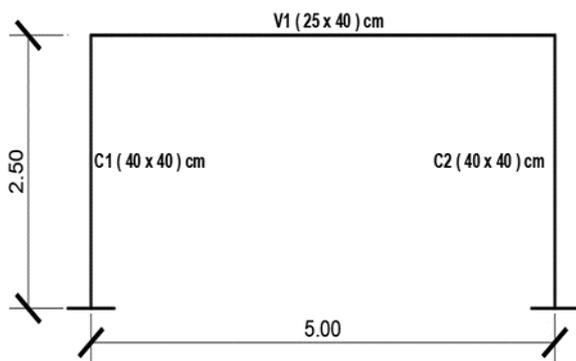


Fig. 1 Vista Corte X-X de Pórtico.

TABLA I.

RESUMEN DE LA DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DE LOS MATERIALES USADOS.

A) Materiales

Concreto		
Resistencia a compresión	210	kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	217370.651	kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de Poisson	0.2	
Acero		
Esfuerzo de fluencia	4200	kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	2000000	kg/cm <sup>2</sup>
B) Cargas empleadas		
Carga muerta		
Concreto	2.4	tonf/m <sup>3</sup>
Carga viva		
Vivienda	0.2	tonf/m <sup>2</sup>

TABLA II.

RESUMEN DIMENSIONES DEL PORTICO

a) Altura y longitud	
Altura de Pórtico	2.5 m.
Longitud de Pórtico	5 m.
b) Dimensiones de elementos Estructurales Columna	
B =	0.40 m
H =	0.40 m
b) Dimensiones de elementos Estructurales Viga	
B =	0.25 m
H =	0.40 m

TABLA III.

COORDENADAS PARA GRAFICAR DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

Descripción	cm	Mn	Pn	φ Mn	φ Pn
Compresión pura	0	0	459.644	0.00	321.75
Fallo equilibrado	20.18	26.54	163.686	18.58	114.58
Fallo frágil	14.5	23.85	97.283	16.69	68.10
Falla dúctil	25.5	24.83	229.360	17.38	160.55
Pura tracción	0	0	-83.580	0.00	-58.51
Fallo frágil	5.7	13.53	12.382	9.47	8.67
Falla dúctil	34.30	19.56	319.408	13.69	223.59

Esto finalmente nos lleva a obtener el Diagrama de Interacción de la Columna para que cumpla con los requisitos mínimos establecidos. Lo podemos ver en la Fig. 2.

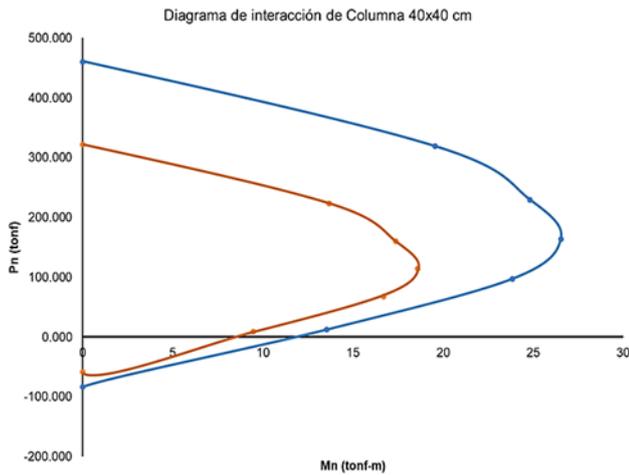


Fig. 2 Diagrama de Interacción.

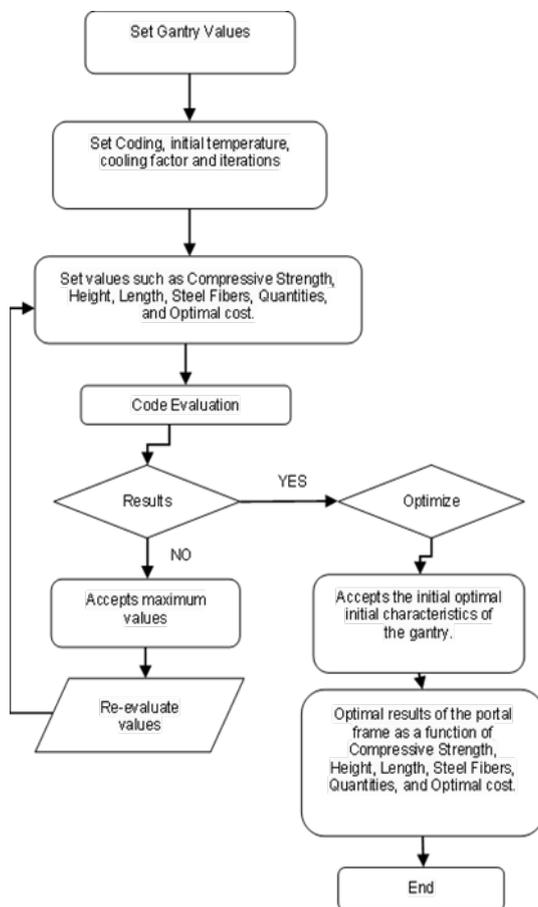


Fig. 3. Procedimiento de Análisis del algoritmo metaheurístico Simulated Annealing.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Evaluar la cantidad óptima de fibras de acero en un pórtico de hormigón armado mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing.

En la Fig. 4, se pueden apreciar los resultados del análisis de la relación entre las fibras de acero y el costo. Mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing, se determinó que la cantidad óptima de fibras de acero es de 20 kg/m<sup>3</sup> en función del costo optimizado. Este resultado es significativo, ya que permite reducir los costos de producción sin comprometer la calidad estructural del hormigón. Comparando este resultado con los obtenidos por [17], se observa una coherencia notable, ya que evaluaron los efectos de la adición de fibras de acero en probetas de concreto, enfocándose en la resistencia a la compresión. Sus resultados mostraron que la adición de fibras de acero en rangos de 20 kg/m<sup>3</sup> a 30 kg/m<sup>3</sup> mejora significativamente la resistencia a la compresión, alcanzando un valor de 212,39 kg/cm<sup>2</sup> con una cantidad de 25 kg/m<sup>3</sup>, en comparación con un diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

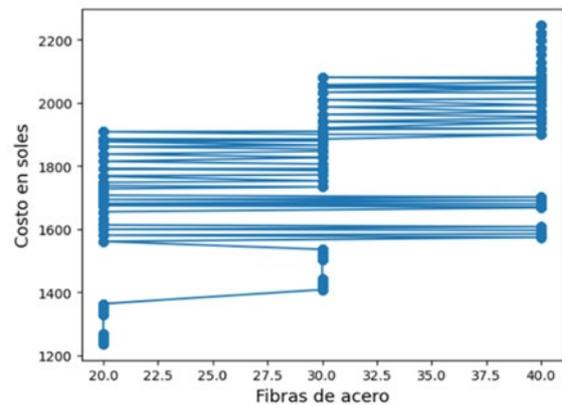


Fig. 4 Relación Fibras de Acero vs Costo.

#### 3.2. Calcular el costo optimizado de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing.

##### a) Costo Optimizado

En la Fig. 5, se observa cómo el costo optimizado del pórtico varió según la serie de iteraciones analizadas. Las dimensiones obtenidas fueron dos columnas de 40 cm x 40 cm y una viga peraltada de 25 cm x 40 cm. Las varillas de acero presentaron una cuantía del 1.25% para las columnas y del 1% para las vigas. Aplicando fibras de acero de 20 kg/m<sup>3</sup>, el costo se optimizó a S/. 1,236.32 nuevos soles, sin considerar la mano de obra, lo que representa una reducción del 67.68% del costo inicial de S/. 3,825.05 analizado mediante el programa S10 sin considerar la mano de

obra. Este resultado concuerda con el obtenido por [11] debido que aplicaron el algoritmo Simulated Annealing y lograron una reducción del costo de una columna en un 47.72%, pasando de S/. 413.18 a S/. 197.00.

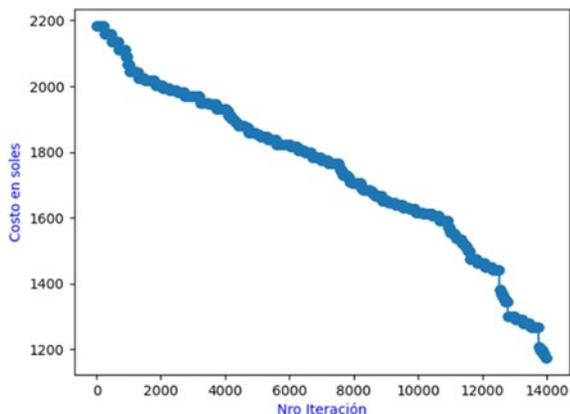


Fig. 5 Costo vs Iteración.

b) Relación de Resistencia a la compresión, cuantía y Costo Óptimo

En la Fig. 6, se obtuvo una relación entre la resistencia a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>, una cuantía de acero del 1.25% para columnas y del 1% para vigas, y un costo optimizado de S/. 1,236.32. Esto demuestra que el pórtico logró ser optimizado mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing, buscando el mejor óptimo en relación con estas tres variables. La optimización no solo redujo costos, sino que también propuso un aumento en la eficiencia en la construcción. En la Fig. 7, el algoritmo Simulated Annealing determinó el porcentaje óptimo de acero, proponiendo un 1.25% para columnas de 40x40 cm y un 1% para vigas de 25x40 cm. Esto es consistente con lo observado por [2] quienes demostraron que los sistemas estructurales diseñados y construidos bajo diferentes condiciones, como costos y análisis específicos del país, presentan parámetros óptimos. En el caso de Cuba, se analizaron los siguientes parámetros: para vigas, las dimensiones geométricas óptimas del acero en tensión varían de 0.6% a 1.5%, en comparación con valores más pequeños en columnas. De esta manera que se concluye que estos resultados obtenidos de los elementos estructurales se encuentran en condiciones óptimas para su construcción.

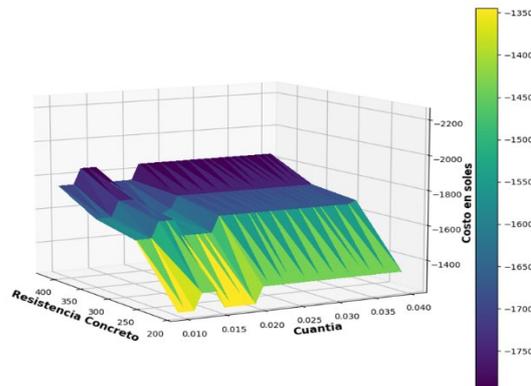


Fig. 6 Relación Resistencia a la compresión vs Cuantía vs Costo.

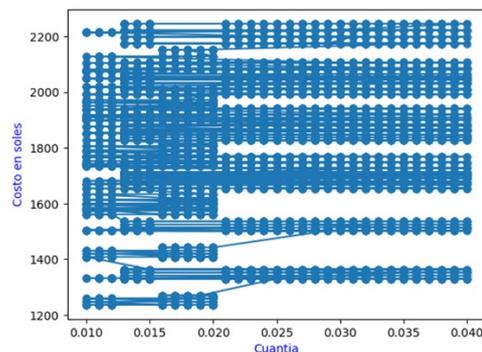


Fig. 7 Relación Cuantía vs Costo.

3.3. Identificar la resistencia a la compresión optimizada de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing.

En la Fig. 8, se determinó mediante el algoritmo Simulated Annealing que la resistencia a la compresión óptima ( $f'_c$ ) es de 210 kg/cm<sup>2</sup> para el diseño del pórtico, el cual consiste en dos columnas de 40x40 cm y una viga de 25x40 cm. Este resultado se enfocó en optimizar el diseño estructural considerando tanto la resistencia como el costo, logrando un equilibrio adecuado para aplicaciones prácticas.

Por otro lado [10] en su análisis del algoritmo Simulated Annealing, evaluó múltiples propuestas en relación a la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) y las comparó con la normativa ACI 318-19. Obteniendo como resultado la fabricación de una viga de concreto armado con una  $f'_c$  de 280 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es significativamente mayor que el obtenido en nuestro estudio debido a factores como la dimensión, materiales, etc.

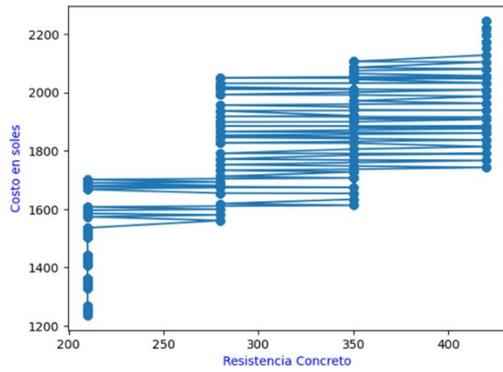


Fig. 8 Relación  $F'c$  vs Costo.

### 3.4. Analizar la optimización del diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de Acero en ETABS.

Se analizó en el programa Etabs con el fin de verificar los resultados obtenidos por el Simulated Annealing, en la Fig. 9 se observan las cortantes cuando  $CM = 0.4$  ton y  $Fh = 1$  tn. En el caso de la viga con diseño de  $b = 25$  cm y  $h = 40$  cm con una longitud de 5 m, cuenta con una cortante máxima en la Carga Muerta de 1.0818 tonf, mientras que en la Columna de  $40 \times 40$  cm C1 cuenta con una cortante en la Carga Muerta 0.0912 tonf y para la columna C2 con una cortante máxima 0.9088 tonf.



Fig. 9 Cortante para carga muerta del pórtico.

En la Fig. 10, donde los Momentos cuando  $CM = 0.40$  tn y  $Fh = 1$  tn se obtiene que la viga tiene una Carga Muerta de 0.5728 tonf-m, en la Columna de  $40 \times 40$  cm C1 cuenta con un momento máxima de la Carga Muerta 0.533 tonf-m y para la columna C2 con un momento máximo de 1.1581 tonf-m.

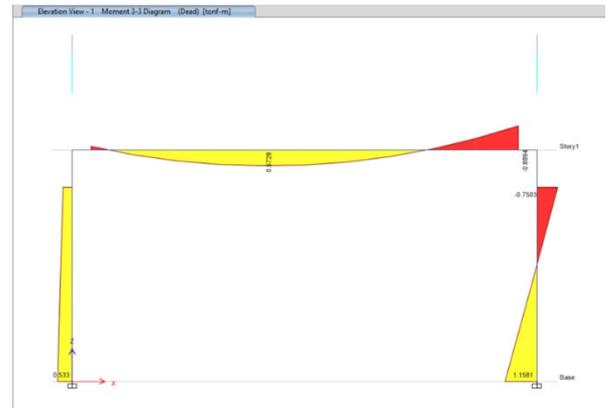


Fig. 10 Momento para carga muerta del Pórtico.

La Fig. 11, se observa el análisis para una cortante con una  $CV = 0.20$  Tn y  $FH = 1$  Tn/m. El resultado muestra que la viga con diseño de  $b = 25$  cm y  $h = 40$  cm con una longitud de 5 m, cuenta con una cortante máxima de la Carga Viva de 0.46 tonf, en la Columna de  $40 \times 40$  cm C1 cuenta con una cortante máxima de la Carga Viva negativa de -0.2078 tonf y para la columna C2 con una cortante máxima de 0.2078 tonf.



Fig. 11 Cortante para carga viva del pórtico.

En la Fig. 12, donde se muestran los momentos donde  $CV = 0.2$  tonf y  $fh = 1$  tonf la viga cuenta con un momento máxima de la Carga Viva de 0.2687 tonf-m, en la Columna de  $40 \times 40$  cm C1 cuenta con un momento máxima de la Carga Viva 0.2732 tonf-m y para la columna C2 con un momento máximo de -0.2732 tonf-m.

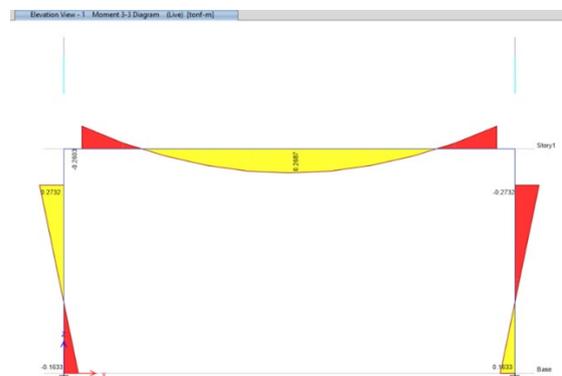


Fig. 12 Momento para carga viva del pórtico.

En la Fig. 13 se analizó el desplazamiento del pórtico en el Eje XX, lo que se expresa que tiene un desplazamiento máximo de 0.000624 m siendo menor al cálculo estimado de la deriva siendo este de 0.0002496 siendo menor a la deriva máxima cumpliendo así con la norma E030, capítulo 5, artículo 5.2.

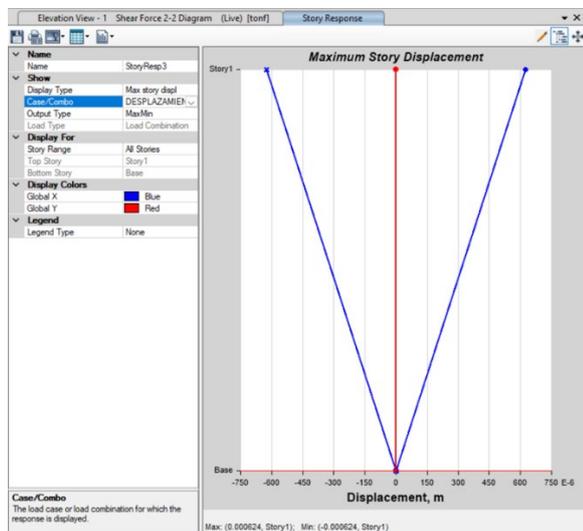


Fig. 13. Verificación de Desplazamientos en XX del Pórtico.

Posterior a ello en la Fig. 14 se obtuvo el área de acero bajo normativa ACI 318-19 y la normativa E060, mostrando que la viga de 25 x 40 cm cuenta con 2.85 cm<sup>2</sup> de área de acero en positivo y negativo, para las columnas cuentan con 19.80 cm<sup>2</sup> cada una, comparando con los resultados de la optimización donde se obtiene para la viga con área de acero total de 11.40 cm<sup>2</sup> y para las columnas C1 y C2 de 19.90 cm<sup>2</sup> cada una, demostrando así que solamente se necesita realizar la optimización metaheurística

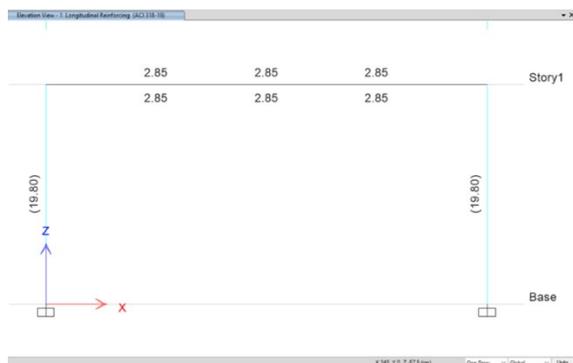


Fig. 14 Área de acero para la viga y las columnas.

Finalmente, en la Fig. 15 y Fig. 16 el análisis de interacciones de la columna C1 y C2 se presenta una falla dúctil cumpliendo con los parámetros de cálculo de la normativa vigente ACI 318-19.

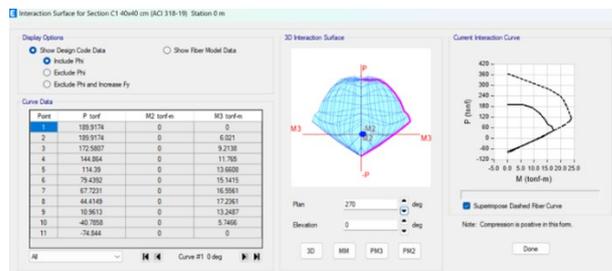


Fig. 15. Diagrama de Interacción de la Columna C1.

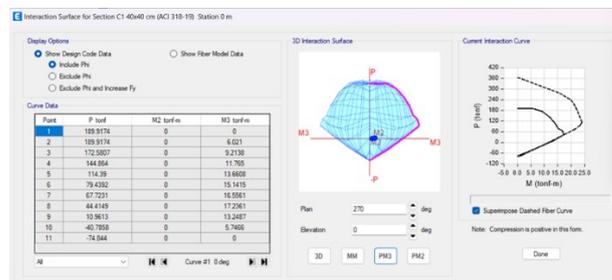


Fig. 16. Diagrama de Interacción de la Columna C1.

La verificación de los resultados en ETABS, concuerdan con [7] donde su análisis obtuvo las derivas y desplazamientos a medida que el corte basal aumenta progresivamente hasta la capacidad máxima el cual tuvo respuestas favorables en la aplicación del programa de ETABS cumpliendo las normativas vigentes para el sistema estructural analizado. Concluyendo que la verificación de sus resultados cumple con las derivas mínimas no menores a 0.007.

#### IV. CONCLUSIONES

- En relación al objetivo general, se logró Optimizar el diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated Annealing, respetando las normativas existentes para la verificación de los elementos estructurales como la N.T.P E.060 y la normativa ACI 319-19, concluyendo que se obtuvo el costo optimizado, las características geométricas ideales del pórtico, los refuerzos longitudinales de los elementos estructurales y las fibras de acero optimas del pórtico.
- Por otro lado, se determinó el Peso (kg/m<sup>3</sup>) óptimo de fibras de acero en un pórtico de hormigón armado mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing, siendo este 20kg/m<sup>3</sup> favoreciendo al costo Óptimo del pórtico.
- Por consiguiente, se obtuvo el cálculo del costo optimizado de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing, siendo este un valor de S/. 1,236.32 nuevos

soles sin considerar mano de obra teniendo como reducción un 67.68 % del costo máximo.

- De forma que se Identificó la resistencia a compresión optimizada de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo Metaheurístico Simulated Annealing, el cual nos arrojó un f'c de 210 kg/cm<sup>2</sup> en cual beneficia al costo Óptimo.
- Finalmente, se analizó en el programa ETABS obteniendo áreas de aceros menores a los optimizados de manera que la optimización del pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero mediante el algoritmo metaheurístico Simulated annealing donde se obtuvo una diferencia de 0.761% para viga entre el calculado y la optimización metaheurística, en columnas es el 0.003 % con el calculado por el ETABS con el Simulado recocido, llegando a la conclusión que la configuración metaheurística con el recocido simulado logró optimizar el diseño de un pórtico de hormigón armado reforzado con fibras de acero, el costo del pórtico y la resistencia a la compresión, generando así soluciones iniciales aleatorias con el fin de minimizar el costo inicial.

## REFERENCIAS

- [1] F. Casado Bravo, «Optimización estructural mediante algoritmos.» Universidad Politécnica de Madrid., 2022.
- [2] I. Negrin, A. Negrin y E. Chagoyén, «Optimization of reinforced concrete plane frames using a hybridization of genetic algorithms and the Nelder-Mead algorithm.» vol. 26, 74-86 2019.
- [3] C. Millan y J. Arrieta, «Optimización del Diseño de Muros de Contención empleando Algoritmo Simulated Annealing Modificado.» 2018. [En línea]. Available: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/187/248>.
- [4] A. Ruiz, J. Alcalá, M. Kripta y V. Yepes, «Optimización De Marcos Articulados Prefabricados De Hormigón Armado Mediante Recocido Simulado Híbrido.» 2022. [En línea]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=161641514&lang=es&site=ehost-live>.
- [5] J. V. Martí, D. Martínez Muñoz y V. Yepes, «Diseño de experimentos para la calibración de la heurística de optimización de muros de contrafuertes.» 2020. [En línea]. Available: <http://congresoache.com/descargas2022/2099.pdf>.
- [6] J. Watts, «section: The Guardian.» 2019. [En línea]. Available: [https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/cemento-material-destructivo-tierra\\_1\\_1675968.html](https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/cemento-material-destructivo-tierra_1_1675968.html).
- [7] D. Ochoa-Guerrero, H. Villegas-Vera, C. Quishpe-Otacoma, K. Tello-Ayala, D. Gómez y N. García-Troncoso, Comparing Analysis of Earthquake-Resistant Housing Construction Methods in Ecuador: Frames vs. Walls, London:

- Proceedings of the 9h World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, 2024, pp. 1 - 7.
- [8] M. M. Sanchez y P. R. Vidal Feliz, «Optimización de las dimensiones de placas mediante el uso de IA para reducir los costos en edificios de 6 pisos en el distrito de Miraflores.» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652826>.
  - [9] J. H. W. Visbal y A. M. Da Costa, «Algoritmo de recocido simulado generalizado para Matlab.» 2019. [En línea]. Available: <https://www.proquest.com/docview/2333943833/abstract/A1AC5A49878D47FFPQ/1>.
  - [10] E. Noriega, «Optimización del Diseño de una Viga de Concreto Armado mediante Simulated Annealing, Perú.» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/30298/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
  - [11] N. L. Neyra Julcamoro y J. A. Cabanillas Jave, «Optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de SIMULATED ANNEALING, PERÚ.» Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, 2022.
  - [12] N. Esteban Nieto, «Tipos de Investigación.» Santo domingo, 2018.
  - [13] A. Alvarez Risco, «Clasificación de las Investigaciones.» Universidad de Lima, 2020.
  - [14] G. P. Guevara Alban, A. E. Verdesoto Arguello y N. E. Castro Molina, «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción),» vol. 4, n° 3, pp. 163-173, 2020.
  - [15] A.-2. A, «Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.» 2022.
  - [16] H. Oliva Cajal, «Diseño y construcción de un túnel de.» España, 2020.
  - [17] M. Farfán, D. Pinedo, J. Araujo y J. Orbegoso, «Steel fibers in the resistance to compression of the concrete,» Gaceta Técnica, vol. 20, n° 2, p. 13, 2019.
  - [18] A. L. Litvinovich, P. M. Rodriguez y Á. E. C. Hevia, «Respuesta Torsional de edificaciones bajo,» Cuba, 2018.
  - [19] A. M. Velez Rios, «Comparación del comportamiento estructural entre muros estructurales rectos, curvos y en ángulo a diferentes niveles de altura frente a fuerzas de viento en la ciudad de Chiclayo,» CHICLAYO, 2022.
  - [20] J. M. Martínez Esquivés, «Diseño de una nave de estructura metálica de tipo almacén industrial sometida a los efectos ambientales en el Perú para una empresa metal mecánica.» CHICLAYO, 2020.
  - [21] J. F. G. Collana, Revisión de la norma peruana y normas internacionales sobre edificios, LIMA, 2018.
  - [22] J. Rueda y J. A. Inaudi, «Reducción de aceleraciones en edificios esbeltos sometidos,» Córdoba, 2022.
  - [23] I. Fernández, V. B. Elena, P. Martín, Y. Corona y I. A. Hernández, «Análisis dinámico de una torre autosoportada sujeta a cargas de viento y sismo,» La Habana, 2018.
  - [24] C. A. Terán, «Simulación numérica de la interacción fluido-estructura para predecir la respuesta de aerogeneradores sin palas a vibraciones inducidas por el viento en ciudades compactas,» Quito. Ecuador, 2022.
  - [25] J. R. G. González y P. A. S. Sánchez, «Diseño teórico de la investigación: instrucciones,» Colombia, 2020.
  - [26] J. L. A. Gonzales, «Diseño y metodología de la investigación,» Arequipa-Perú, 2021.
  - [27] T. y. Master, «Descubre las diferencias entre variable dependiente e independiente,» Mexico, 2022.
  - [28] C. R. Rodríguez, «LAS VARIABLES,» España, 2021.
  - [29] M. e. E. N. Toledo, «Poblacion y muestra,» mexico, 2018.
  - [30] P. Condori-Ojeda, «Universo, población y muestra,» Estados Unidos, 2020.

- [31] J. R. Vásquez Morón y M. T. Del Carpio Huarcaya, «Análisis comparativo de los métodos dinámicos Modal,» Ica, 2020.
- [32] c. Betis, «TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS PARA REALIZAR UN TRABAJO DE INVESTIGACIÓN,» 2020.
- [33] R. A. Aduviri, «Algoritmo Genético Multiobjetivo para la Optimización de la Distribución de Ayuda Humanitaria en Caso

de Desastres Naturales en el Perú,» 2019. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/15478>.

- [34] L. Beltrán y Z. Ñaupari, «Sintonización de un Controlador PID para un Péndulo Invertido Mediante Algoritmos Meta-Heurísticos: Luciérnaga y Recocido Simulador,» 2020. [En línea]. Available:

<https://www.revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/623>.