

Optimización de pórticos planos de hormigón armado utilizando una hibridación de algoritmos genéticos y el algoritmo Nelder-Mead

Optimization of reinforced concrete plane frames using a hybridization of genetic algorithms and the Nelder-Mead algorithm

Fecha de envío: 5 de febrero 2019

Fecha de aceptación: 14 de octubre 2019

Iván A. Negrin, Alejandro Negrin y Ernesto L. Chagoyén

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcción, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, indiaz@uclv.cu, anegrin1986@gmail.com, chagoyen@uclv.edu.cu

En el trabajo se presenta el diseño de un algoritmo utilizando CSi Application Programming Interface (CSi API) que permite la automatización del proceso de optimización estructural de pórticos planos, vinculando potentes herramientas computacionales como SAP2000v16 y Matlab. Además, se incluyen aspectos usualmente ignorados en la modelación y el análisis estructural durante la optimización, como la influencia de la fisuración de los elementos en su rigidez y la inclusión de un análisis de segundo orden. Por otra parte, debido a la complejidad de la función objetivo, fue necesario utilizar métodos metaheurísticos de optimización: una hibridación entre algoritmos genéticos y el algoritmo Nelder-Mead, por encima de los métodos clásicos empleados en estudios precedentes, obteniendo resultados satisfactorios. Los resultados se expresan en forma de recomendaciones de diseño y se comparan con los obtenidos en investigaciones previas.

Palabras claves: optimización estructural, metaheurísticas, algoritmos genéticos, algoritmo Nelder-Mead

This paper presents an algorithm using CSi Application Programming Interface (CSi API), which allows the automation of the structural optimization process for plane frames, linking powerful computational tools such as SAP2000v16 and Matlab. In addition, aspects usually ignored in modelling and structural analysis for structural optimization are included, such as the influence of cracking of concrete elements in their stiffness and the inclusion of a second order analysis. On the other hand, due to the complexity of the objective function, it was necessary to use metaheuristic optimization methods: a hybridization between genetic algorithms and the Nelder-Mead algorithm, instead of the classical methods used in previous studies, obtaining satisfactory results. The results are expressed in the form of design recommendations and they are compared with those obtained in previous investigations.

Keywords: structural optimization, metaheuristics, genetic algorithms, Nelder-Mead algorithm

Introducción

El desarrollo de las investigaciones en el campo de las estructuras ha contribuido notablemente al logro de proyectos cada vez más racionales, tratando siempre de que estos tengan cada vez más, una relación seguridad-costos más cercana a la óptima real. Se ha avanzado mucho en el campo de las normativas de cargas, cálculo estructural, y modelación de estructuras. En la etapa actual, donde se impuso el Análisis y Diseño Asistido por Computadoras, de nada vale tener un amplio y potente software estructural si no se hace una adecuada interpretación de la problemática a resolver y se emplea de forma inteligente en reducir los costos de la estructura a proyectar (Negrin, 2014). La

metodología habitual del proyecto de estructuras supone un proceso iterativo, que parte de la realización por parte del ingeniero de un pre-dimensionamiento (o definición de unas dimensiones y de unos materiales para los elementos estructurales) a partir de su experiencia y de reglas establecidas por la práctica. Posteriormente, se confecciona un modelo de dicha estructura utilizando las invariantes de la modelación mecánica para ello (geometría, condiciones de apoyo, material, masa y cargas). Dicho modelo se somete al análisis estructural, y a partir de sus resultados y los principios de la resistencia de materiales y disciplinas afines, de modelos de comportamiento de los materiales y de las prescripciones de las normativas vigentes, se efectúa

el diseño, y se comprueba su idoneidad. Normalmente es necesario realizar varios ajustes y correcciones sobre las hipótesis y pre-dimensionamiento inicial, hasta obtener un diseño suficientemente seguro y, por tanto, apto para su ejecución. En este proceso, que se ilustra en la Figura 1, la experiencia del proyectista tiene una gran influencia en la calidad del resultado final y en el tiempo empleado para obtenerlo, al existir múltiples soluciones para un mismo problema (e.g. Negrin, 1987; Payá, 2007).

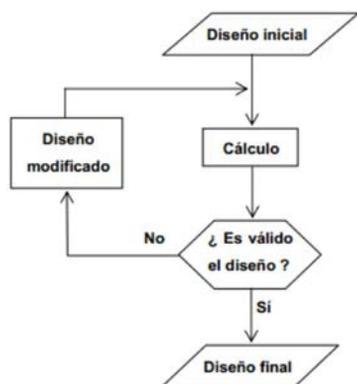


Figura 1: El proceso del diseño estructural (Payá, 2007)

Resulta muy importante no sólo dotar a los especialistas de la construcción de conocimientos necesarios para la explotación de las herramientas de cálculo, si no también crear habilidades en los mismos para poder interpretar correctamente los resultados brindados por estas ayudas y el uso de los mismos para modelar diversos problemas relacionados con el Análisis y Diseño Estructural. Además, hoy día se debe proyectar buscando siempre la variante más racional para toda la estructura y no para un elemento en particular, entiéndase por ésta: la de menor costo y mejor ejecutable, menor impacto medio-ambiental, respuesta ante un determinado fenómeno, o la combinación de dos o más de estos objetivos: nos estamos refiriendo al concepto de Diseño Óptimo de Conjuntos Estructurales (Negrin, 2005; Negrin, 2014; Negrin, 2016).

Se puede decir que el Problema de Optimización Estructural consiste en una búsqueda de diseños estructurales que minimicen una función objetivo, para un conjunto de variables de diseño definidas y teniendo en cuenta restricciones a cumplir, tales como: valores máximos de esfuerzo o deformación, volumen, masa, etc. (Negrin, 1987), obteniendo la *mejor solución* en dependencia del objetivo de la optimización.

Podemos apreciar entonces que la optimización de estructuras no es una búsqueda ciega entre distintas variantes de solución de un proyecto dado, sino un complejo problema en el que influyen infinidad de factores que inciden en la correcta solución del problema, y que para lograrlo es necesario una sólida base científica. Para ello se hace imprescindible formular matemáticamente el problema (modelación matemática), siendo este el paso más importante del proceso (Negrin, 2014).

Definición del problema de optimización

La modelación matemática de un problema de optimización consiste en la definición de la o las funciones objetivos y de las variables de que dependen, así como de todas las restricciones que lleva el proceso (Negrin, 2005). El problema de la optimización de una estructura se formula matemáticamente de la siguiente forma:

$$\min_x f(x) \quad (1)$$

Sujeta a:

$$h_j(x) = 0, j = 1, \dots, n_1$$

$$g_j(x) \leq 0, j = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2$$

En donde $x \in \mathfrak{R}^n$ son las variables de diseño, $f(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ es la función objetivo, $h_j(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ son las restricciones de igualdad y $g_j(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ son las restricciones de desigualdad. Como se observa en las definiciones anteriores, las funciones $f(\dots)$, $h(\dots)$ y $g(\dots)$ pueden ser funciones lineales y/o no lineales.

Función objetivo

La función objetivo es la que mide cuantitativamente el funcionamiento del sistema en un proceso de optimización. Esto quiere decir que se busca una maximización o minimización de esta, y es la base para seleccionar dentro de un conjunto de diseños aceptables, o sea, que cumplen con todas las restricciones del problema. Debido a la versatilidad de la función objetivo para adaptarse al problema propuesto, esta función puede ser continua, discreta o mezclada en aquellos casos en donde entre ciertos intervalos la función se define como discreta y en otros intervalos se define como continua. Además de esto, la convexidad de la función objetivo determina la existencia de un único punto óptimo o en caso contrario, la

existencia de múltiples puntos óptimos (Cujía, 2010).

En el caso de este trabajo, se utilizó la función objetivo asociada a costo mínimo de la súper-estructura, es decir, sin incluir la cimentación:

$$F = C_{columnas} + C_{vigas} \quad (2)$$

Donde F es la función objetivo costo total (\$), $C_{columnas}$ es el costo total de las columnas (\$), obteniéndose:

$$C_{columnas} = C_{encc} + C_{ecc} + C_{eccc} + C_{ebre} + C_{ecbre} + C_{ehc} + C_{chc} \quad (3)$$

Siendo C_{encc} el costo de encofrado de las columnas (\$), C_{ecc} el costo de elaboración de cercos para las columnas (\$), C_{eccc} el costo de ensamblaje y colocación de cercos en las columnas (\$), C_{ebre} el costo de elaboración de barras de refuerzo principal en columnas (\$), C_{ecbre} el costo de ensamblaje y colocación de barras de refuerzo principal en columnas (\$), C_{ehc} el costo de elaboración de hormigón para las columnas (\$), C_{chc} el costo de colocación de hormigón en las columnas (\$) y C_{vigas} es el costo total de las vigas (\$), que se determina como:

$$C_{vigas} = C_{encv} + C_{ecv} + C_{eccv} + C_{ebrv} + C_{ecbrv} + C_{ehv} + C_{chv} \quad (4)$$

En donde C_{encv} es el costo de encofrados en vigas (\$), C_{ecv} es el costo de elaboración de cercos para vigas (\$), C_{eccv} es el costo de ensamblaje y colocación de cercos en vigas (\$), C_{ebrv} es el costo de elaboración de barras de refuerzo en vigas (\$), C_{ecbrv} es el costo de ensamblaje y colocación de barras de refuerzo en vigas (\$) C_{ehv} es el costo de elaboración de hormigón para vigas (\$) y C_{chv} es el costo de colocación de hormigón en vigas (\$).

Variables

Los parámetros variables pueden tomar diferentes valores en el proceso de optimización. Estos afectan directamente la función objetivo, buscándose, en este proceso, una combinación que minimicen (o maximicen) dicha función. Para lograr una correcta elección de estos, se debe conocer principalmente, cual es el criterio de optimización seleccionado y que aspectos influyen en el mismo.

En nuestro caso, planteamos tres variables independientes (ver Figura 2) que son las dimensiones de las secciones transversales de los elementos: $p(1)$: peralte de las vigas,

$p(2)$: ancho de vigas y columnas y $p(3)$: peralte de las columnas.

Para simplificar el proceso de optimización y por razones constructivas, se decidió mantener igual el ancho de las vigas y de las columnas, así como las dimensiones de columnas y vigas interiores y exteriores respectivamente, sabiendo que, en dependencia del tipo de elemento, van a estar sometidos a solicitaciones diferentes. La diferencia está en el área (cuantía) de acero, es decir, una columna interior y exterior tendrá las mismas dimensiones, pero su distribución de acero será diferente, lo mismo ocurre en las vigas.

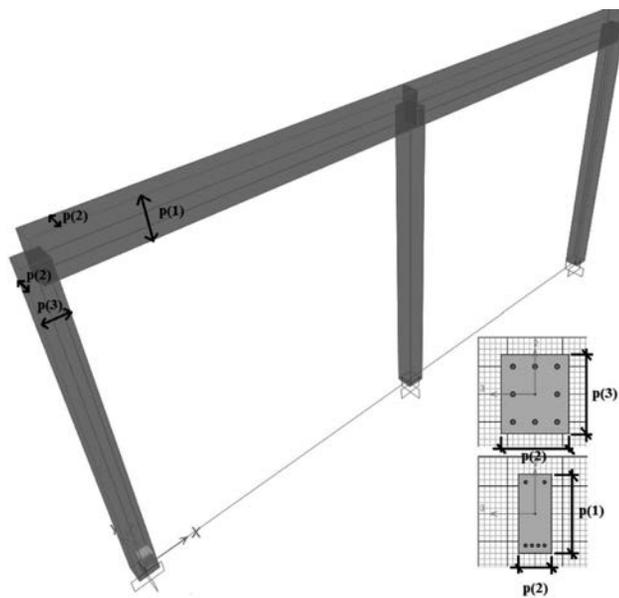


Figura 2: Variables independientes del proceso de optimización.

Restricciones

Constituyen una limitación, representada en un conjunto de relaciones existentes que deben satisfacerse para que el diseño sea correcto. En la formulación matemática del proceso de optimización se definió que pueden existir restricciones de igualdad y desigualdad. En nuestro caso, no fue necesario introducir este tipo de restricciones, solamente los límites o el intervalo que pueden recorrer las variables, a las cuales llamamos restricciones explícitas, porque intervienen directamente en el proceso de optimización. Por otra parte, existen otro tipo de restricciones a las cuales llamamos implícitas porque están presentes dentro del proceso de diseño, las cuales garantizan que los elementos cumplan los criterios de resistencia, rigidez, fisuración, ductilidad y constructivos.

Para nuestro caso, las restricciones explícitas serían: $L/20 \leq p(1) \leq L/6, 0.25 \text{ m} \leq p(2) \leq 0.4 \text{ m}$ y $0.25 \text{ m} \leq p(3) \leq 0.5 \text{ m}$.

Como se ha mencionado con anterioridad, las restricciones para este caso son los intervalos de movimiento de las variables, donde L es la luz libre del pórtico. En el caso del ancho de los elementos el valor mínimo se establece por razones constructivas, que generalmente es 0.25 m. Las restricciones implícitas se introducen en el algoritmo, las de resistencia están incluidas en las herramientas de diseño del programa SAP2000 (2016) (cumplimiento de las ecuaciones de estado). Las demás se incluyen como rutinas en la programación, donde, al no cumplirse se penaliza la función objetivo. De forma general, la Figura 3 representa gráficamente la definición del problema de optimización.

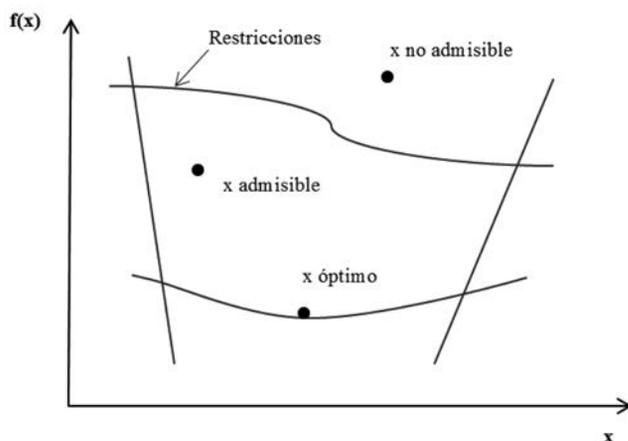


Figura 3: Representación gráfica de un problema de optimización

Parámetros asignados

Los parámetros asignados tienen gran importancia en un problema de optimización estructural y no varían a lo largo del proceso. Su influencia en los resultados finales es enorme y muchas veces los resultados se expresan en relación con estos. Para la modelación de las cargas se utilizaron las normas vigentes para la densidad de los materiales (NC 283, 2003), para las cargas de uso (NC 284, 2003) y para las cargas de viento (NC 285, 2003). Además, se utilizaron las recomendaciones que aparecen en Medina Torri (1996) para tales fines. Para la investigación en cuestión, algunos de los parámetros asignados más relevantes son:

- Altura de columnas: 3.5 y 4 m
- Luz libre: 4-6-8 m
- Tipos de cargas:

- Carga permanente de cubierta:
 - Losa de hormigón armado de 12 cm (Peso específico $\rho_{\text{hgon}} = 24 \text{ kN/m}^3$)
 - Mortero de cemento Portland 2.5 cm (Peso específico $\rho_{\text{mortero}} = 20 \text{ kN/m}^3$)
 - Enrajonado 10 cm ($0.18 \text{ kN/m}^2/\text{cm}$)
 - Soladura-loza de barro 1.25 cm (0.05 kN/m^2)
- Carga permanente de entrepiso:
 - Losa de hormigón armado de 12 cm (Peso específico $\rho_{\text{hgon}} = 24 \text{ kN/m}^3$)
 - Mortero de cemento Portland 2.5 cm (Peso específico $\rho_{\text{mortero}} = 20 \text{ kN/m}^3$)
 - Relleno de mejoramiento 5 cm ($0.18 \text{ kN/m}^2/\text{cm}$)
 - Losa de granito ($0.26 \text{ kN/m}^2/\text{cm}$)
- Carga temporal de cubierta:
 - Desagüe libre y accesible solo para mantenimiento: 0.8 kN/m^2
- Carga temporal de entrepiso
 - Oficinas y locales administrativos: 2.0 kN/m^2
- Carga de viento para las condiciones del occidente del país y un sitio expuesto, de acuerdo a la normativa vigente (NC 285, 2003)

d) Tipología de los elementos: columnas y vigas rectangulares

e) Condiciones de apoyo: como no se tiene en cuenta la interacción suelo estructura, se considera empotrada al suelo

f) Tipo de encofrado: metálico

g) Forma de fabricación: in situ

h) Resistencia a compresión especificada del hormigón $f'_c = 25 \text{ MPa}$

i) Límite de fluencia del acero de refuerzo (transversal y longitudinal) $f_y = 300 \text{ MPa}$

j) Diámetro de los cercos: 10 mm

k) Recubrimiento de 3.5 cm

l) Elaboración y colocación de las armaduras: manual

- m) Elaboración del hormigón: hecho en planta
- n) Colocación del hormigón: con bomba

Es importante señalar que en esta investigación se considera la influencia durante el diseño de algunos factores que usualmente se ignoran durante la modelación y el diseño estructural con fines de la optimización, como es el caso de la reducción de la rigidez por fisuración en elementos de hormigón armado y el análisis de segundo orden (Chagoyén y Hernández, 2010). La Interacción Suelo-Estructura (ISE) no ha sido tomada en consideración en este problema ya que este representa un primer acercamiento a la temática. En futuras investigaciones se insertará en el proceso con sus correspondientes hipótesis, los cuales nos permitirán emitir consideraciones en cuanto a su uso en este tipo de problemas.

Métodos aplicados al problema de optimización

Los métodos de optimización implican procesos matemáticos que, según su naturaleza, se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos clásicos (usan las derivadas) y los métodos heurísticos o metaheurísticos (no usan derivadas de la función objetivo) (Cujía, 2010).

Métodos clásicos

Para el desarrollo de este trabajo un método de optimización clásico es aquel que usa las derivadas (gradientes). Se puede decir que estos métodos buscan y garantizan un óptimo local, sin un tiempo determinado. Los métodos con derivadas se basan en tres algoritmos fundamentales: pendiente máxima (*steepest descent*), el método de Newton y el método Levenberg-Marquart (Maes *et al.*, 2017; Roose, 2017). Sin embargo, no son los únicos métodos y algoritmos, pero todos los demás resultan de mejoras y combinaciones de estos (Cujía, 2010).

En la presente investigación no se pretende abordar estos métodos debido a su ineficiencia para resolver problemas complejos de optimización, con funciones objetivo que presenten discontinuidades y sean poco convexas, con presencia de muchos óptimos locales (Cujía, 2010; Payá, 2007).

Métodos heurísticos y metaheurísticos

Un método heurístico es aquel que no utiliza metodología común, y rigurosa para obtener un resultado. Estos métodos dan un resultado aceptable en tiempo aceptable, además de su aplicabilidad cuando se presenta una función objetivo con múltiples puntos óptimos o cuando estas funciones están compuestas por intervalos continuos y discretos. Para la clasificación presentada, son todos aquellos métodos que no usan derivadas de la función objetivo (método riguroso), sino que usan la función objetivo como tal. Su manera de buscar soluciones se fundamenta en el uso de conceptos intuitivos basados en sistemas naturales, como por ejemplo la evolución. El solo hecho de no usar derivadas, que en ciertos casos pueden ser tediosas o aún casi imposibles de obtener, les da a estos métodos una flexibilidad, y una gran extensión de aplicabilidad cuando las condiciones del modelo son complejas (Cujía, 2010).

Los métodos metaheurísticos surgieron en los primeros años de la década de los 80. Se centran en el diseño de estrategias generales que sirvan para guiar a las heurísticas, tratando de combinar inteligentemente diversas técnicas para explorar el espacio de soluciones. Una definición muy exacta es la brindada por Osman y Kelly (1996). Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística.

Algunos de estos métodos son:

- Algoritmos Genéticos (GA)
- Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)
- Particle Swarm Optimization (PSO)
- Biogeography-based Optimization (BBO)
- Simulated Annealing (SA)
- Algoritmo Nelder-Mead

En el marco de esta investigación se abordarán dos en especial: Algoritmos Genéticos y el algoritmo Nelder-Mead, utilizando una hibridación entre estos.

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son una herramienta utilizada para la resolución de problemas de optimización. Están basados en la selección natural, una analogía con el proceso que gobierna la evolución biológica. Los GA modifican sistemáticamente una población de individuos: en cada paso el algoritmo selecciona algunos individuos para que se conviertan en “padres” y generen los “hijos” de la siguiente generación. A través de sucesivas generaciones la población evoluciona hacia una solución óptima. La principal ventaja que ofrece es que puede utilizarse en una gran variedad de problemas donde los métodos convencionales de optimización no se desenvuelven bien, entre ellos problemas con funciones objetivo discontinuas, no diferenciables, estocásticas o altamente no lineales (Aligia, 2017).

En gran parte, su auge y proliferación en los últimos tiempos se debe a su carácter robusto, que les permite abordar con éxito gran variedad de problemas de áreas muy diferentes. Además, aunque no se pueda garantizar que el GA encuentre la solución óptima al problema, existe la certeza empírica de que ofrecerá una solución de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo. Es cierto que no son la respuesta perfecta para abordar todos los problemas. Existen situaciones que cuentan con métodos concretos más rápidos y efectivos que los GA. Aun así, otra de las ventajas que ofrecen es que permiten mejorar estas técnicas específicas hibridándolas con su propia metodología (Carretero López, 2010).

El algoritmo se inicia con la creación de una población inicial de individuos, normalmente de un modo aleatorio, pero podrían usarse métodos determinísticos. Posteriormente, se asigna una aptitud a cada uno de los elementos de la población, dependiendo de su valor de la función objetivo y del grado de cumplimiento de las restricciones del problema. Seguidamente, individuos de esta población son seleccionados de acuerdo con ciertas reglas (operador “selección”) y combinados entre sí (operador “crossover” o “cruzamiento”) para crear una nueva población. Finalmente, se emplean los operadores

“mutación” para introducir nuevas características en la población, de modo que su evolución no se estanque prematuramente y, opcionalmente, se utiliza el operador “elitismo” que asegura que un determinado número de los mejores individuos de una generación pasen a la siguiente. Este proceso se repite hasta que se cumple el criterio de convergencia del algoritmo. Esta estrategia básica, sin el operador elitismo, se conoce en la literatura como el Simple Genetic Algorithm (ver Figura 4).

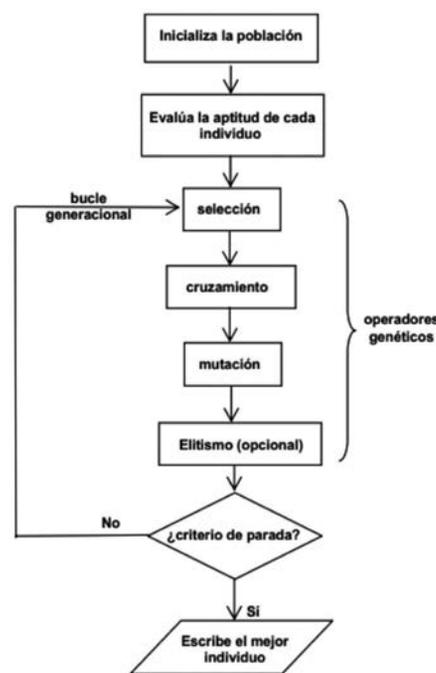


Figura 4: Diagrama de flujo de un GA básico (Payá, 2007)

Algoritmo Nelder-Mead

El simplex de Nelder and Mead (1965), también denominado simplex no-lineal es un algoritmo heurístico propuesto para la optimización de funciones objetivo sin restricciones. Dicho algoritmo, que sólo usa valores de la función, no de su derivada, se basa en conceptos geométricos (Zapatero *et al.*, 2011) en el uso de polígonos con diferentes formas geométricas (reflexión, expansión, reducción y contracción), que utiliza la inclinación del plano hallado para direccionar la búsqueda y así obtener una aproximación al óptimo local (Gómez *et al.*, 2012).

El algoritmo Nelder-Mead parte de un simplex no degenerado, en cuyos vértices tenemos aproximaciones al óptimo global. Dicho simplex se va modificando, bien al cambiar alguno de sus vértices por otro en el que la

función objetivo haya disminuido, o bien al contraer todo el poliedro si no se ha conseguido mejorar la función objetivo con el simplex inicial (Figuras 5 y 6). Es por tanto un algoritmo de carácter local que carece además de componente aleatoria (Zapatero *et al.*, 2011).

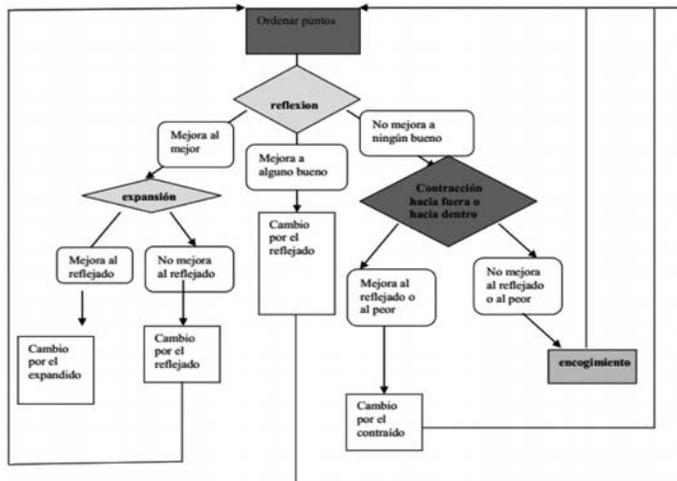


Figura 5: Diagrama de flujo del método de Nelder-Mead (Zapatero *et al.*, 2011)

El simplex se adapta al entorno de la función objetivo como una ameba, y de esta forma encuentra un mínimo local cercano. El paso simple consiste en reemplazar el peor punto con un punto que se refleja a través del centro de gravedad de los N puntos restantes. Si este punto resulta mejor que el mejor punto actual, entonces podemos tratar de estirar el polígono de forma exponencial, a lo largo de esta línea. Mientras que, si este nuevo punto no es mucho mejor que el valor anterior, entonces se intensificará a través de un valle, por lo que se reduce el simplex hacia un punto mejor (Roose, 2017).

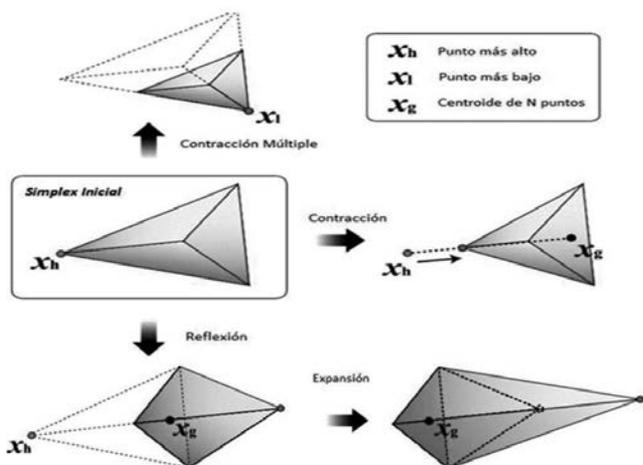


Figura 6: Operaciones básicas del método de Nelder-Mead (Cujía, 2010)

Diseño del algoritmo de solución utilizando CSi API

El algoritmo de solución al problema de diseño óptimo de conjuntos estructurales utilizando el CSi API (Chagoyén, 2016) entre un software de análisis y diseño estructural y un lenguaje de programación, evidentemente debe ser diseñado en base a las características de funcionamiento de una interfaz entre los dos programas, basándose fundamentalmente en las funciones que nos permiten esta interacción entre estos. En este caso los programas involucrados, como se ha mencionado con anterioridad son SAP2000 (2016) y Matlab (2010). De forma general, los pasos fundamentales o generales quedan reflejados en el diagrama de flujo de la Figura 7.

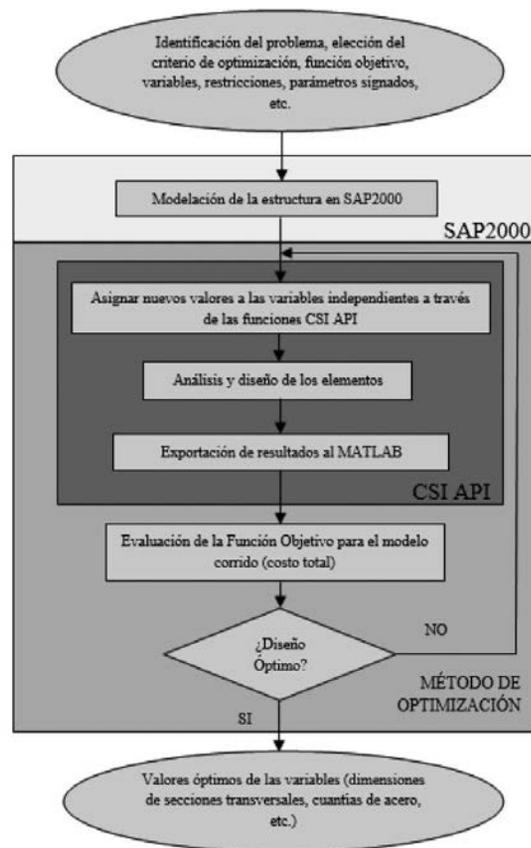


Figura 7: Diagrama de flujo general del algoritmo de solución al problema del diseño óptimo de pórticos planos utilizando CSi API

Elección del método de optimización

El empleo de la CSi API SAP2000-Matlab para resolver problemas de optimización, abarcó la optimización de un pórtico plano de hormigón armado (Negrin, 2016), donde, debido a la limitada cantidad de aspectos que se tuvieron en

cuenta, la función objetivo resultaba relativamente sencilla (Figura 8a) y al problema se le daba solución mediante los métodos clásicos (programación no-lineal).

En la presente investigación se han incluido aspectos como: incrementar el número de luces y niveles, trabajar con el área real del refuerzo y no con el área de refuerzo de cálculo y realizar un despiece y corte de barras, lo cual como se muestra en la Figura 8b, complejizó la superficie de respuesta de la función objetivo.

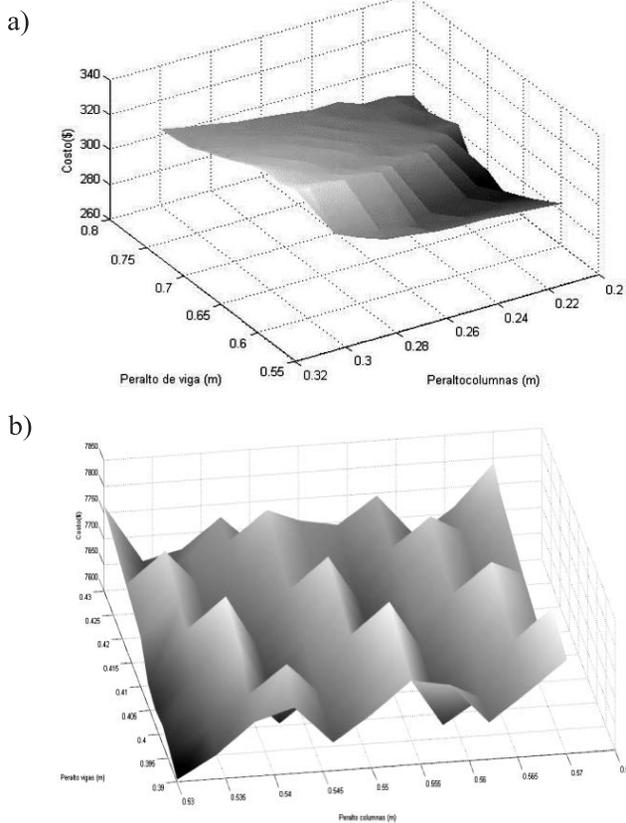


Figura 8: Incremento de la complejidad de la función objetivo: a) antes y b) después

En las superficies de respuesta mostradas en la Figura 8, se puede apreciar como en estudios previos la función es más suave, con una pendiente marcada, mientras que en la función actual se observa la presencia de muchos óptimos locales, lo cual inhabilita el uso los métodos clásicos.

El primer paso fue aplicar GA, con todas sus opciones por defecto, obteniendo soluciones bastante diferentes y en un tiempo prolongado. Luego de modificar algunas de estas opciones como: establecer una población inicial, basada en la concentración de puntos iniciales (población inicial) en

la región común de los intervalos óptimos de las variables obtenidos en investigaciones previas (Figura 9), establecer la selección por torneo *tournament* o el cruzamiento mediante el punto intermedio *intermediate*, se lograron resultados satisfactorios, disminuyendo considerablemente el tiempo de cómputo y estabilizando los resultados finales.

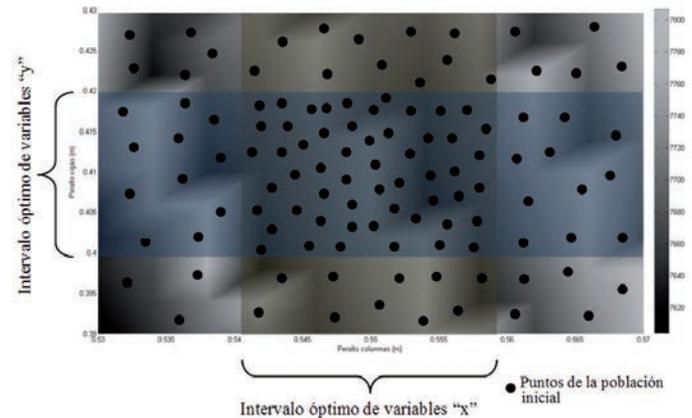


Figura 9: Población inicial brindada a GA

A pesar de esto, estos resultados obtenidos no coincidían en muchas ocasiones. Los GA no garantizan que el punto encontrado sea el óptimo global de la función (Figura 10). Si habiendo una certeza empírica que ese punto está muy cerca del óptimo global, para este tipo de problemas de relativa poca complejidad, es decir, que el algoritmo empieza a desechar soluciones, concentrándose en la zona donde se encuentran las mejores.

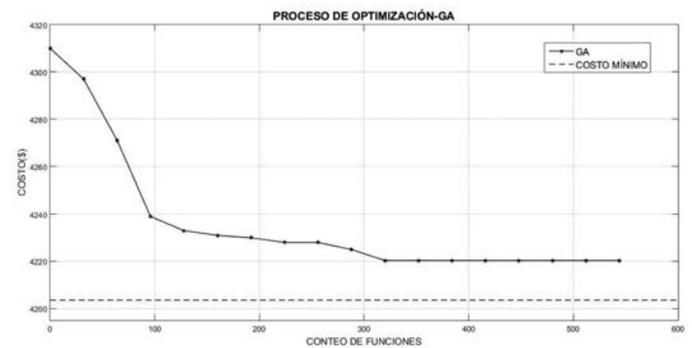


Figura 10: Proceso de optimización mediante GA

Esto da paso a la utilización de un algoritmo heurístico de búsqueda local, en este caso el algoritmo Nelder-Mead, el cual parte con el punto inicial obtenido con GA hasta obtener el costo mínimo de la estructura y los correspondientes valores óptimos de las variables.

Como se puede apreciar en la Figura 11, con la hibridación de estos dos métodos se pudo dar solución al problema planteado, ya que GA garantiza encontrar, generalmente, de entre los huecos que tiene la función objetivo, el que posee la mayor profundidad (óptimo global) y establecer un punto muy cercano a este, el cual sirve de partida al algoritmo Nelder-Mead que continúa la búsqueda hasta llegar al diseño que acarrea el costo mínimo de la estructura.



Figura 11: Proceso de optimización utilizando la hibridación entre GA y Nelder-Mead

Resultados de la optimización

Para la obtención de los resultados del proceso de optimización se hace énfasis en tres aspectos: relación luz libre del pórtico/peralte total óptimo en vigas (L/h_{opt}), cuantía geométrica económica de acero a tracción en vigas ($\rho_{geom-econ}$) y relación peralte/ancho óptimo en columnas, este último relacionado con el uso de columnas rectangulares. De manera general, todos los datos están asociados con la luz libre del pórtico, debido a la dependencia de todos estos aspectos con esta característica geométrica.

Para la obtención de todos estos datos se optimizaron pórticos de una, dos y tres luces, con uno y dos niveles, donde la luz libre L es de 4-6-8 m y la altura de los niveles es $H1 = 4$ m y $H2 = 3.5$ m, siendo $H1$ y $H2$ las alturas de los primeros y segundos niveles respectivamente (Figura 12). En todos los casos, los vínculos a tierra se consideraron empotrados.

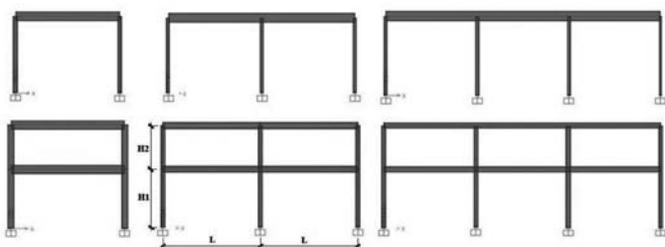


Figura 12: Variantes de pórticos optimizados

Peralto óptimo en vigas

Como se puede apreciar en la Figura 13, hay una tendencia a aumentar la relación L/h con el aumento de L , como es lógico, aunque la pendiente de las curvas tiende a ir disminuyendo debido a que al aumentar L también aumenta el peralte óptimo. Destacar aquí que h es el peralte total de las vigas. Por otra parte, en estructuras de 2 niveles la relación aumenta, debido a que son estructuras más complejas, donde cada viga de manera individual pierde influencia en la rigidez de la estructura completa, aspecto fundamental por el cual en este tipo de estructuras se obtienen peraltes relativamente grandes. Cuantitativamente los valores de L/h_{opt} oscilan en un intervalo entre 8.5 y 13.5 aproximadamente.

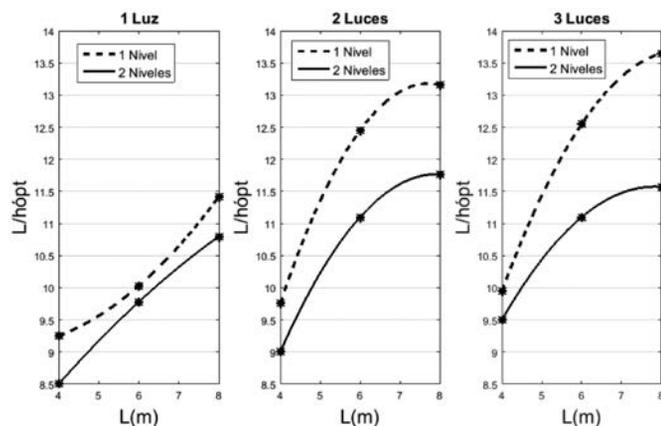


Figura 13: Gráficos de la relación L/h_{opt} versus L en vigas

Cuantía geométrica económica (óptima) en vigas

Para este caso la tendencia es similar que el caso anterior (Figura 14), donde, con un aumento de L también existe un aumento de la cuantía geométrica, que es la relación entre áreas de acero y efectiva de la sección de hormigón, expresado en %. Cuantitativamente los valores se encuentran entre 0.6 y 1.5%.

Relación peralte-ancho óptimo en columnas

El uso de columnas rectangulares es un tema interesante. Para este caso, donde se trabaja con pórticos planos, sólo existirán solicitaciones en dos direcciones, por lo que, evidentemente, el peralte quedará en la dirección longitudinal del conjunto estructural, para tener mejor respuesta a las solicitaciones que aparecen en esa dirección, debido fundamentalmente a la carga de viento y las que provienen de las vigas, provocando momento

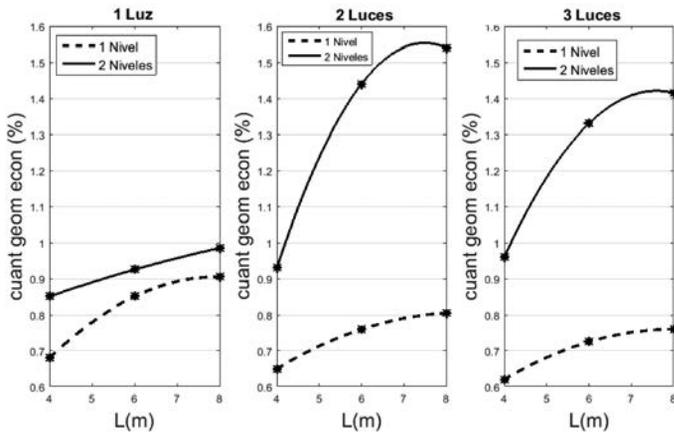


Figura 14: Gráficos de la relación de cuantía geométrica económica versus L en vigas

flector (columnas exteriores). Como se aprecia en los gráficos de la Figura 15, para estructuras de dos niveles las relaciones son mayores, debido a que existe un incremento evidente de carga axial y con esto un aumento de la sección transversal de las columnas, y, como se ha concluido en investigaciones previas, lo más económico es mantener el ancho el mínimo posible por especificaciones, por lo que se concluye aumentando el peralte. Por otra parte, al aumentar la luz libre del pórtico también hay un incremento de la relación, o lo que es lo mismo, un aumento del peralte económico, para enfrentar las solicitaciones que aumentan, principalmente el momento flector transmitido de vigas a columnas. En cuanto a valores se refiere, las relaciones peralte/ancho óptimo oscilan entre 1.02 y 1.80, con la tendencia explicada anteriormente.

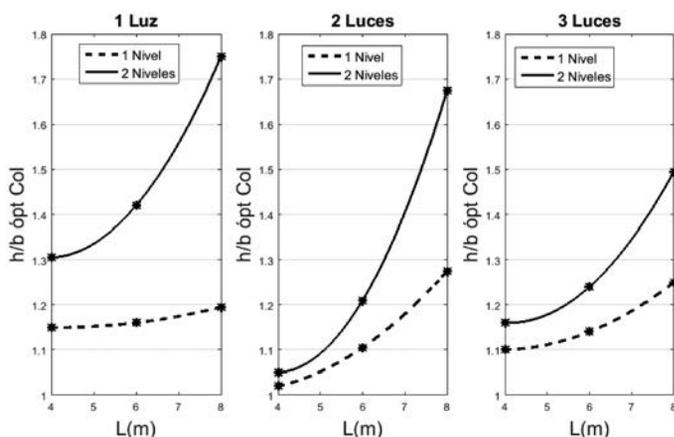


Figura 15: Gráficos de la relación peralte total/ancho económico en columnas versus L

Comparación con trabajos precedentes

La idea de realizar la optimización del conjunto estructural completo y no de los elementos aislados comenzó en (Negrin, 2010), donde se optimizó el diseño estructural de dos pórticos conformados por viga, columnas y cimientos, cada uno con una luz de 7 m y con alturas de 6 y 4 m para tener en cuenta el predominio de carga de viento en un caso y de carga permanente y de uso en el otro, denominados a partir de ahora pórtico tipo I para el primer caso y pórtico tipo II para el segundo. Los pórticos tipo III y IV son los de esta investigación (Figura 16). Se incluyeron factores como reducción de inercia por fisuración, análisis de segundo orden y sobre todo la interacción suelo-estructura, considerando la cimentación sobre apoyos elásticos mediante la hipótesis de resortes de Winkler. En el trabajo se estudió la influencia de las diferentes variables sobre el costo total de la estructura: peralte de la viga, peralte de la columna, resistencia a compresión del hormigón, profundidad de cimentación y rectangularidad de cimientos. El tipo de suelo utilizado fue el número 1 (Tabla 1).

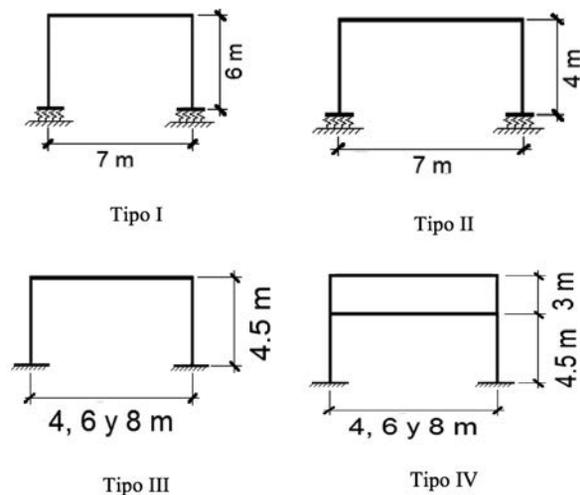


Figura 16: Pórticos tipo I, II, III y IV

Posteriormente Negrin (2014) extendió el trabajo, donde se optimizó el diseño de un pórtico tipo I, la diferencia radicó en el enfoque, el cual se centró en el tipo de suelo sobre el cual se apoyaba la estructura, y la influencia de sus características en el diseño óptimo de los elementos que componen el conjunto. Las variables analizadas fueron las mismas estudiadas en los ejemplos previos. Los suelos utilizados fueron el 2, 3 y 4 (Tabla 1).

Tabla 1: Características de los suelos utilizados en Negrin (2010, 2014)

Suelo	ϕ , °	c , kPa	E , MPa	γ , kN/m ³	μ	β , °	Descripción
1	8	60	12	19.0	0.40	76	Suelo limo arenoso, limo, arcilla arenosa y arcilla con $IL > 0.50$
2	20	30	20	18.0	0.35	63	Suelo limo arenoso, limo, arcilla arenosa y arcilla con $IL \leq 0.25$
3	32	10	15	17.5	0.30	56	Suelo arenoso muy fino: seco y húmedo
4	43	5	35	18.0	0.23	45	Suelo gravoso, gravo arenoso y arenoso: grueso a medio.

ϕ : ángulo de fricción interna; c : cohesión; E : módulo de Young; γ : peso unitario; μ : razón de Poisson; β : ángulo de la excavación para el cual el talud tiene estabilidad durante la construcción de la cimentación, lo cual define el volumen de suelo a excavar; IL : índice de liquidez del suelo

Aunque las investigaciones tienen enfoques distintos, tocan puntos comunes como la relación luz/peralte óptimo, lo cual se tratará de reflejar en el gráfico de la Figura 17, donde se toman los resultados de la presente investigación para pórticos de una luz, con uno y dos niveles (tipo III y VI) y se introducen los resultados obtenidos por Negrin (2010, 2014), en el primer caso para los pórticos tipo I y II, con la correspondiente resistencia a compresión utilizada (25 y 30 MPa) y el tipo de suelo 1, y en el segundo caso pórticos tipo I, con $f'_c = 25$ MPa, con los tipos de suelo 2, 3 y 4.

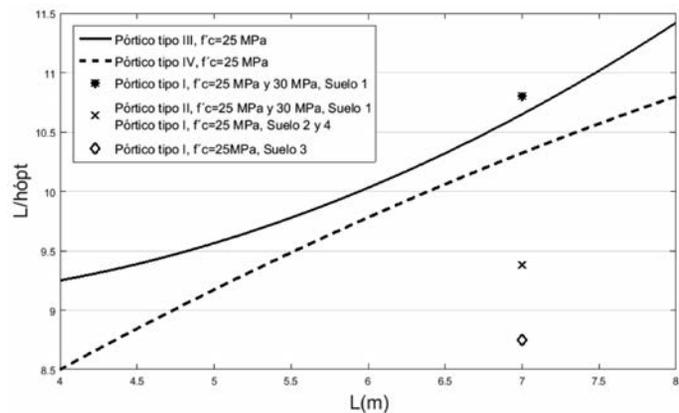


Figura 17: Comparación de valores de la relación L/h_{opt} versus L (m) para diferentes pórticos, resistencia a compresión del hormigón f'_c y tipos de suelo (donde se tiene en cuenta la interacción suelo-estructura ISE)

Como se puede apreciar en la Figura 17, los resultados de las investigaciones previas quedan dentro de los intervalos obtenidos en este trabajo. Estos últimos se representan en

forma de curvas, debido a que se utilizaron varios valores de L , mientras que los realizados por Negrin (2010, 2014), se introducen en forma de puntos, ya que los pórticos optimizados tenían una L constante de 7 m.

De forma general, se puede decir que, en los resultados actuales, hay un aumento de la relación L/h_{opt} debido a la influencia del peralte de las vigas en la rigidez de la estructura, quedando, para estructuras que tienen en cuenta la ISE, peraltos óptimos mayores y la correspondiente disminución de la relación. El resumen de la comparación se puede apreciar en la Tabla 2, con los resultados obtenidos por diferentes autores y los posibles motivos de la diferencia.

Tabla 2: Comparación de resultados de L/h y cuantía óptima con autores precedentes

Autor	L/h óptima	$\rho_{geométrica}$ óptima %	Observaciones
Negrin (2019)	8.5-13.5	0.6-1.5	Pórticos de 1 y 2 niveles, con 1, 2 y 3 luces, considerando reducción de inercia por fisuración y análisis de segundo orden, sin considerar ISE y sin incluir cimientos en costo. Propiedades de los materiales: $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 300$ MPa. Costos actuales de Cuba.
Negrin (2016)	8.5-11	0.8-0.99	Pórticos planos, considerando reducción de inercia por fisuración y análisis de segundo orden, sin considerar ISE y sin incluir cimientos en costo. Propiedades de los materiales: $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 300$ MPa. Costos actuales de Cuba.
Negrin (2014)	8-11	-	Pórticos planos, considerando reducción de inercia por fisuración y análisis de segundo orden, incluyendo ISE y costos de cimentación. Propiedades de los materiales: $f'_c = 25-30$ MPa, $f_y = 420$ MPa. Costos actuales de Cuba.
Negrin (1987)	10-12	0.59-1.53	Vigas aisladas, sin considerar reducción de inercia por fisuración ni análisis de segundo orden, $f'_c = 21$ MPa, $f_y = 280$ MPa. Costos de Honduras (país importador de acero).
Castellanos (2000)	10-12	-	Vigas aisladas, sin considerar reducción de inercia por fisuración ni análisis de segundo orden, $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 300$ MPa. Costos de Cuba de 1999.
Borda y Rodríguez (2010)	16-18	0.33-0.68	Estructura aporticada de dos niveles, optimización de elementos por separados. Propiedades de los materiales: $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 420$ MPa. Costos de Bolivia.

Conclusiones

Para resolver problemas de optimización de conjuntos estructurales, se debe tener muy bien definidos: el criterio de optimización que responda a las necesidades o intereses del proyectista, las variables que verdaderamente influyan en el diseño de todos los elementos que compongan el conjunto, los parámetros asignados que lógicamente influirán en la solución final, todas las restricciones posibles que limiten el movimiento de las variables y el o los métodos de optimización que satisfagan las exigencias del problema.

Los algoritmos genéticos GA son métodos eficientes, realizando los ajustes oportunos en sus mecanismos de trabajo, pero no garantizan encontrar el óptimo global de la función objetivo, aunque si hay una certeza empírica de que el punto encontrado está cercano a este (para problemas relativamente sencillos como los de esta investigación), el cual, con una mezcla o hibridación con otros métodos eficientes de búsqueda local, en este caso el algoritmo Nelder-Mead, puede ser encontrado. Además, se puede manejar la opción eficiente de brindar una población inicial a los GA, ya sea como en este caso, mediante intervalos óptimos de las variables, obtenidos de investigaciones previas, o utilizando otro método para generar esta población; logrando así obtener un método robusto de optimización estructural.

Por otra parte, los resultados estructurales más significativos obtenidos para los costos en Cuba y las demás condiciones del problema analizado, son: en vigas, la relación L/h está en el orden de 8.5 a 13.5, mientras que la cuantía geométrica óptima de acero en tracción oscila entre un 0.6 y un 1.5 %, siendo el valor más pequeño correspondiente a pórticos de menor luz libre, menor cantidad de luces y niveles, y viceversa; en columnas se recomienda el uso secciones rectangulares en la dirección longitudinal, con relación peralte/ancho entre 1.05 y 1.8, aumentando esta relación para pórticos de más niveles, luces y mayor luz libre, manteniendo siempre el menor ancho posible por especificaciones constructivas o de diseño.

Finalmente, comparando los resultados con otros obtenidos en la optimización de pórticos planos de hormigón armado considerando la ISE, e incluyendo los costos de cimentación en la función objetivo, se pudo comprobar que los resultados óptimos difieren de manera significativa

con los obtenidos en esta investigación, indicando que la ISE y la inclusión de la cimentación son aspectos, que no deben ser soslayados durante la formulación del problema de optimización de conjuntos estructurales.

Recomendaciones

A manera de recomendación se debe analizar la posibilidad de utilizar más métodos de optimización global, utilizando además hibridaciones fuertes con el propósito de obtener un método robusto de optimización, pudiéndose incluir dentro del algoritmo, un meta modelo (redes neuronales) que garanticen una convergencia más rápida del método.

En cuanto a la modelación: la inclusión de la ISE y el diseño y costo de la cimentación dentro del costo total del conjunto estructural, como función objetivo, deben tenerse en cuenta por su influencia en el comportamiento de la estructura modelada y en la función objetivo.

Agradecimientos

Se agradece la contribución de dos proyectos de colaboración internacional financiados por el Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR (SI-VLIR Computational Techniques for Engineering Applications y TEAM-VLIR Vibration Assessment of Civil Engineering Structures), en los cuales se desarrollaron cursos de posgrado sobre métodos numéricos, optimización, dinámica estructural y otras temáticas afines, así como la utilización de software. Se agradece la contribución del Profesor Dr. Dirk Roose del Departamento de Ciencias de la Computación, y los Profesores Dr. Geert Lombaert, Dr. Stijn Françoise y Dr. Kristof Maes del Departamento de Ingeniería Civil, de la Universidad Católica de Leuven, en Bélgica. A todos nuestro sincero reconocimiento y agradecimiento por su aporte desinteresado y el conocimiento transferido, que hizo posible este y otros trabajos.

Referencias

- Aligia, A. (2017). *Algoritmos genéticos utilizando Matlab. Inteligencia Artificial I. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina*
- Borda, J.L. y Rodríguez, G. (2010). *Optimización de secciones transversales de pórticos de hormigón armado mediante uso de la técnica de programación cuadrática secuencial SQP. Mecánica Computacional* 25, 9719-9738

- Carretero López, F. (2010). *Optimización global con algoritmos genéticos*. Trabajo final de carrera, Escuela Politécnica Superior de Catalunya, España
- Castellanos, J. (2000). *Procedimiento general para el diseño óptimo de estructuras. Aplicaciones en vigas de H.A.* ISPJAE-Tesis de grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Ciudad Habana, Cuba
- Chagoyén, E.L. (2016). Apuntes curso de posgrado CSi OAPI SAP 2000 - Matlab. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- Chagoyén, E.L. y Hernández, J.J. (2010). Influencia de distintos factores en la modelación, análisis y diseño automatizado de estructuras de hormigón. *Noveno Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*, noviembre 2010, Santa Clara, Villa Clara, Cuba
- Cujía, Y.D. (2010). *Computación en paralelo aplicada a la optimización del diseño estructural: estado del arte*. Proyecto de título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia
- Gómez, S., Paiño, D. y Vélez, C. (2012). Variante del método de Nelder & Mead para optimización de funciones multivariadas. *Cuaderno ACTIVA* 4, 62-73
- Maes, K., Lombaert, G., Van Nimmen, K., Papadopoulos, M. and de Roeck, G. (2017). Model updating in structural dynamics. Post-graduate course notes, team-VLIR project VIBRAS, 6 - 10 February 2017, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba
- Matlab (2010). The MathWorks, Inc. «*MathWorks - Matlab & Simulink*». la.mathworks.com
- Medina Torri, F. (1996). *Cargas de edificaciones y obras de ingeniería*. Tomos I y II. 2^{da} Edición. Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba
- NC 283 (2003). Densidad de los materiales. Oficina Nacional de Normalización, Comité Estatal de Normalización. La Habana, Cuba
- NC 284 (2003). Cargas de uso. Oficina Nacional de Normalización, Comité Estatal de Normalización. La Habana, Cuba
- NC 285 (2003). Carga de viento. Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización, Comité Estatal de Normalización. La Habana, Cuba
- Nelder, J.A. and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal* 7(4), 308-313
- Negrin, I.A. (2019). *Herramienta para el diseño óptimo de conjuntos estructurales "DOCE". Aplicaciones*. Tesis de maestría, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba
- Negrin, I.A. (2016). *Optimización de conjuntos estructurales considerando los factores usualmente ignorados en la modelación usando la OAPI SAP2000-MATLAB*. Proyecto de título (diploma) de Ingeniero Civil, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- Negrin, A. (2014). *Optimización de conjuntos estructurales de edificios aporticados de hormigón armado*. Tesis de maestría, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- Negrin, A. (2010). *Optimización de conjuntos estructurales de edificios aporticados de hormigón armado*. Proyecto de título de Ingeniero Civil, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- Negrin, A.R. (2005). Un enfoque general sobre diseño óptimo de estructuras. *Boletín Estadístico de la Construcción*. Cámara Hondureña de la Construcción. Tegucigalpa, Honduras, 12-14
- Negrin, A.R. (1987). *Proyección óptima de elementos de hormigón armado a compresión no centrada*. Tesis doctoral, Instituto de Ingeniería de la Construcción de Kiev, República Socialista Soviética de Ucrania
- Osman, I.H. and Kelly, J.P. (1996). Meta-heuristics: an overview. In *Meta-heuristics. Theory and applications*. Springer, 1-21
- Payá, I. (2007). *Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, España
- Roose, D. (2017). Numeric simulation. Post-graduate course notes, Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE, La Habana, April 2017.
- SAP2000 (2016). Structural Analysis Program. Integrated software for structural analysis and design, v.19. Computers and Structures Inc., Berkeley
- Zapatero, M.J., Alegre, J. y Pacheco, J. (2011). Análisis de algunas metaheurísticas creadas a partir de "Optimización Gravitatoria". *Anales de ASEPUMA* 19: 0902, 1-16