

Criterios de refuerzo por traslapes y empalmes a través de programación visual para el diseño óptimo de marcos de concreto reforzado

Luis Fernando Verduzco Martínez (1), Jaime Moisés Horta Rangel (2), Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández (3), Juan Bosco Zaragoza (4)

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Santiago de Querétaro, Querétaro, México

(1) luiz.verduz@gmail.com, (2) horta@uaq.mx, (3) migperez@uaq.mx, (4) bosco@uaq.mx

Resumen- En el presente trabajo se expone el desarrollo y aplicación de un proceso de diseño óptimo para marcos de concreto reforzado tomando en cuenta distribuciones óptimas de varillado de refuerzo en los elementos estructurales bajo criterios de refuerzo por traslapes y empalmes libres de choques, además de otras restricciones por especificaciones de códigos (ACI-318 y NTC-17) tales como separación mínima y área de refuerzo máxima, a través de programación visual en ANSYS-SpaceClaim usando lenguaje Python para la generación automática de dibujos de detalle con CAD. Se emplea inteligencia artificial con el algoritmo metaheurístico de optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization PSO) debido a su rápida convergencia para encontrar dimensiones óptimas de los elementos del marco en cuestión, y se empleó el método de Gradiente Descendiente de Mayor Inclinación (Steepest Gradient Descent Method SGD) con la analogía (Idealized Smeared Reinforcement ISR) para determinar las distribuciones óptimas de varillado en los elementos mediante búsqueda simple, considerando acero simétrico en las columnas. Se experimentó con un solo modelo numérico estructural bajo dos enfoques para las comparativas de resultados: bajo criterios de empalmes y traslapes libres de choques en los elementos y el otro sin considerar dichos criterios. Los resultados muestran el alto grado de influencia que tiene el considerar tales criterios de diseño de refuerzo en las uniones de los elementos por traslapes y empalmes libres de choques en la convergencia hacia las óptimas dimensiones de las estructuras, traduciéndose en una redistribución completamente diferente de fuerzas en los elementos que las componen. Además se obtienen excelentes resultados finales visuales de detallado de refuerzo, demostrando de esta forma que bajo este criterios se pueden obtener diseños y modelos numéricos que se asemejen más a lo que en realidad se tiene y se hace en el sitio de la construcción.

Palabras clave: EST*, marcos de concreto reforzado, criterios de refuerzo, programación visual, optimización, inteligencia artificial

Abstract- In the present work the development and application of an optimal design process for reinforced concrete frames is exposed, taking on account optimal distributions of reinforcing bars in the structural elements under free-clash and slab reinforcement criteria, aside of other restriction by code specifications (ACI-318 and NTC-17) such as minimum separation and maximum reinforcement area, through visual programming in ANSYS Space-Claim using Python language for the automatic generation of detail CAD drawings. Artificial Intelligence is employed with the meta-heuristic Particle Swarm Optimization algorithm (PSO) given its rapid convergence to find optimal dimensions of the elements for a structural frame, and the Steepest Gradient Descent Method (SGD) was used along with the Idealized Smeared Reinforcement analogy (ISR) to find optimal distributions of rebar in such elements through simple search, considering symmetric reinforcement in columns. Only one numerical structural model was built for experimentation under two different design approaches for comparison: one under free-clash and slab reinforcement criteria and another without considering such criteria. Results show a great influence in the optima convergence of dimensions by considering such reinforcement criteria, Besides, great final visual detailing results of such reinforcement are obtained, demonstrating thus, that it is possible to generate with the technology nowadays available more accurate models for civil infrastructure that may represent better construction conditions under which structures are subject to.

Keywords: EST*, reinforced concrete frames, reinforcement criteria, visual programming, optimization, artificial intelligence

1. Introducción.

La inteligencia artificial ha estado revolucionando la forma en que se analiza y diseña la infraestructura civil desde el inicio de la comercialización de las computadoras a inicios de los 70's. Hoy en día es posible realizar diseños de estructuras de una forma mucho más rápida y con resultados más viables en cuanto a costo, insumos y sustentabilidad. El empleo de metaheurísticas es lo más común en cuanto a optimización de estructuras de concreto reforzado se refiere (ver [1]), tales como los Algoritmos Evolutivos (EA) y Optimización por Enjambres (OE) pudiéndose obtener excelentes resultados no solo en cuanto a calidad y precisión de los diseños sino también en tiempos de ejecución. En la literatura se puede encontrar una gran variedad de enfoques para la adaptación

de metodologías de IA en diversos tipos de análisis así como diversos criterios aplicados al proceso de optimización de estructuras de CR (ver [2], [3], [4]) La tendencia ahora se ha convertido en la adopción de criterios de daño y desempeño en los procesos de diseño óptimo (ver [1]) tal que se tomen en cuenta costos por reparación estimados a lo largo del ciclo de vida de las estructuras [5], control de desplazamientos laterales [6] o factores de seguridad al colapso y rigidez global [7]; además, a través de un análisis por desempeño es posible estimar el grado de ductilidad o resistencia que desarrollará la estructura ante las condiciones críticas del entorno así como la definición de otros parámetros característicos de interés.

Por otra parte, el uso de metodologías de Building Information Modelling (BIM) es

ahora también un factor clave para integrar en los procesos de diseño óptimo, tomando en cuenta tanto criterios como sea posible, en un flujo de trabajo interactivo y dinámico, sean criterios de diseño como de construcción, tales como: detallado del refuerzo en los elementos a base de traslapes, cortes y empalmes (ver [8], [9]), de modo que se pueda pasar de las etapas de análisis y diseño hasta la etapa de planeación y construcción de manera casi automática e instantánea con la ayuda de software CAD. Este paradigma de trabajo es el futuro no solo en la ingeniería sino en toda área de la ciencia, es decir, el crear procesos autónomos que lleven a cabo tareas que antes parecía que solo los humanos las podían llevar a cabo, incluso con resultados óptimos.

En la actualidad en la optimización estructural referente a marcos de concreto se han creado procesos de diseño que toman incluso el propio acomodo óptimo de varillado en los elementos [10], [11], de manera que al término del proceso óptimo de diseño solo se requieren algunos o si es que ningún mayor ajuste para pasar a la elaboración de planos de detallado de construcción. Bajo esta tendencia se pueden obtener resultados más realistas tanto en los modelos numéricos como en los diseños referente a lo que se tiene y se hará realmente en la construcción. La programación visual más que solo el usar tecnologías BIM se vuelve un factor preponderante, como lo demuestran diversos autores [11], [12], con la que se pueden verificar los resultados de diseño de manera gráfica conforme converge el proceso óptimo, teniendo de esta forma un mejor control de las variables del proyecto.

Es de vital importancia el continuar con investigación referente a diferentes

enfoques de diseño óptimo en las estructuras, no solo con diversas metodologías o algoritmos, sino con distintos criterios de análisis y diseño, con la finalidad de ligar lo mayor posible la etapa de diseño con la de construcción y crear formulaciones más precisas y confiables para las prácticas de ingeniería. Para las estructuras de concreto, el refuerzo mismo en las conexiones o uniones de elementos es un factor de gran influencia en el desempeño estructural. Debido a la naturaleza de los diseños del refuerzo y por aspectos de construcción se podrían diseñar las uniones de refuerzo en los elementos de distinta forma, ya sea considerando la continuidad del acero en los mismos [10] o considerando los diseños de refuerzo de cada elemento por separado [11]. Mientras que por un lado el considerar la continuidad de las varillas en las uniones de los elementos se ha demostrado es lo más recomendable [13] debido a la naturaleza de la distribución discontinua de elementos mecánicos tanto en vigas como en columnas, no resulta viable considerarlo así cuando se requiere de la determinación de dimensiones óptimas de sección de los elementos (por restricciones de recubrimiento o separación de varillado), en esta parte el considerar apropiadamente cortes y anclajes puede reducir significativamente los costos de construcción [9]. Además, debido a que es más común el diseño del refuerzo en los elementos de un sistema estructura de manera independiente sería recomendable el establecer criterios de diseño y análisis que se adaptaran precisamente a estas prácticas comunes en la construcción.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollar un proceso de diseño óptimo para marcos de CR tomando en cuenta criterios de refuerzo por empalmes libres de choques entre las

uniones de los elementos de un sistema estructural bajo un enfoque de acero no continuo, es decir, en donde no se considera que el acero de refuerzo sea continuo precisamente entre las uniones de los elementos, sino que únicamente se traslapa el acero de refuerzo de cada elemento. Además, se pretende estudiar la influencia en la respuesta sísmica y desempeño de los marcos estructurales, así como el peso y costo, haciendo comparaciones de dichos parámetros y comportamientos con otros modelos y análisis-diseños en donde no se consideran dichos criterios dentro del proceso de diseño óptimo. Con el uso de programación visual se pretende tener una mejor apreciación de la calidad de los diseños resultantes y de su grado de practicidad.

2. Metodología, materiales y métodos

Se presenta a continuación una secuencia general de actividades que se siguieron para la elaboración de esta investigación:

- Primeramente, se construyó la topología del modelo numérico estructural de experimentación. El modelo fue un marco plano tipo pórtico irregular con la siguiente geometría **Fig. 1**

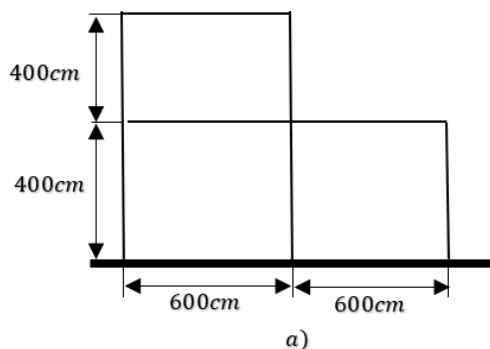


Figura 1: Geometría del modelo numérico estructural de experimentación.

- Posteriormente se integraron los criterios y mecanismos de diseño para elementos viga, columna y zapatas aisladas de forma que se computarizaron los procesos en sincronía con la ejecución de los análisis estructurales (de acuerdo a propuestas en otros trabajos **Fig. 2**). Para las columnas se tomaron consideraciones de acero simétrico y por porcentaje de acero óptimo con la analogía ISR. Mientras que para vigas y zapatas se consideraron distribuciones convencionales con alternativas de refuerzo en paquetes de dos barras

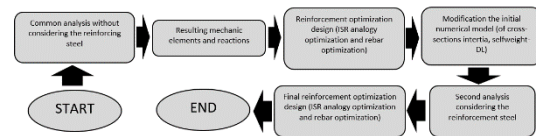


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de análisis-diseño empleado en el proceso de diseño óptimo de los marcos estructurales [10].

- Como siguiente etapa se integraron criterios de diseño para marcos estructurales en general como un sistema bajo consideraciones de estructuras de ductilidad alta. Además, se integraron procesos de análisis estático no-lineal y sísmico lineal modal para la determinación de Índices de Daño y Factores de Seguridad al colapso
- Una vez integrados los criterios y restricciones básicos de análisis y diseño tanto para los elementos estructurales que componen al marco como para el marco tipo mismo, se adaptó el método de optimización a emplear (en este caso el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas PSO)

- e) Bajo estos criterios se realiza una experimentación aún sin considerar criterios de refuerzo por empalmes y traslapes libre de choques, la cual toma en cuenta la distribución de varillado de forma simétrica en las columnas
- f) Una vez hecha la experimentación previa se formularon los criterios de diseño del refuerzo por traslapes y empalmes libres de choques, tanto para vigas como para columnas, y se integraron al proceso computacional
- g) Finalmente, se experimentó con los criterios de refuerzo ya formulados tomando en cuenta la distribución óptima de las varillas, variando los recubrimientos de los elementos

A. Antecedentes en optimización estructural

Es de gran importancia el tomar en cuenta tantos factores como sea posible en las etapas más tempranas del diseño y planeación de un proyecto estructural para tener un mejor control de las variables que intervienen o intervendrán en las etapas venideras o incluso a lo largo del ciclo de vida de un proyecto. En el caso de estructuras de concreto reforzado las variables que usualmente se consideran en el proceso de diseño son: *dimensiones de secciones transversales, material, número de elemento, longitudes de elementos o ubicación de los elementos*. Es en estas etapas en donde se pueden conjuntar estas variables para dar forma a un proceso iterativo de diseño óptimo, en donde se establece una función objetivo $F(x)$ que regirá el diseño (costo, peso, rigidez, etc.) y definirá el valor de las variables involucradas. Tal modelo de optimización se puede formular como (1) cuando solo se

considera una función objetivo. En donde x es el conjunto de variables de diseño, k es el número de variables de diseño, $g_i(x)$ son las restricciones de diseño, m es el número de total de las restricciones de diseño, $x_{(j)}^{(L)}$, x_j^U son el rango máximo y mínimo de valores que pueden tomar las variables de diseño involucradas.

$$F(x) = \begin{cases} g_i(x), i = 1, 2, \dots, m \\ x_j^L \leq x_j \leq x_j^U, j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (1)$$

Es de vital importancia que se defina una función objetivo de manera adecuada. Cuando de costo se trata, esta debe representar los componentes de costo más influencias del sistema. Para el caso de estructuras de CR, es recomendable que se tomen en cuenta al menos el concreto y el acero de refuerzo, aunque algunos autores proponen también que la cimbra siempre sea considerada [18]. En algunos trabajos se ha propuesto establecer la función objetivo en función de las acciones de la estructura [18] de tal manera que no se tenga que diseñar en cada iteración el acero de refuerzo en cada elemento, esto con el fin de hacer el proceso computacional más ligero. Sin embargo, otros autores recomiendan que el varillado y sus restricciones se tomen en cuenta en todo proceso de diseño óptimo de estructuras de CR [11], debido a que la mera separación mínima requerida de las varillas podría definir las dimensiones de las estructuras óptimas resultantes.

A este punto se han desarrollado ya bastantes metodologías y algoritmos a emplear para el diseño óptimo del acero de refuerzo en los elementos de concreto tal que sea factible computacionalmente el considerar tal variable de distribución de varillado en los procesos de diseño óptimo. Es cuestión de tiempo para que estas tecnologías sean cada vez de mayor aplicación dada la era en la que

estamos inmersos, es decir, el requerimiento de cada vez generar modelos y metodologías más de mayor precisión y de mayores criterios.

B. Optimización de acero de refuerzo en secciones de concreto

La analogía ISR, por sus siglas en inglés "Idealized Smearred Reinforcement" es una idealización que se le puede dar al acero de refuerzo sobre una sección transversal de concreto para implementar metodologías de diseño óptimo, obteniendo áreas mínimas requeridas de refuerzo para transformar a varillado. Se han desarrollado diferentes metodologías computacionales para la aplicación de esta analogía al diseño de elementos de concreto reforzado, tanto con formulaciones matemáticas [19] para secciones rectangulares como con formulaciones de discretización para cualquier tipo de geometría. Dichas metodologías se llevan a cabo a través de métodos de optimización, sean clásicos o estocásticos [20].

C. Diseño basado en desempeño

Hay distintas formas de evaluar el desempeño de una estructura; ya sea por el daño sufrido en los elementos de esta, o incluso en los sistemas internos del edificio o instalación y el contenido que pueda resguardar. En cuanto criterios de desempeño por comportamiento están la "formación de uniones plastificadas", "pandeo local", "distorsión de juntas" o probabilidad de fractura. Más, sin embargo, el daño en los elementos estructurales está íntimamente relacionado con el desempeño por comportamiento de estos.

Refiriéndose específicamente a desempeño por daño en los componentes estructurales o en el sistema estructural de manera global se requieren de análisis

estructurales en el rango plástico para la determinación de mecanismos o condiciones críticas al colapso de las estructuras. El análisis estático no-lineal paso a paso o también conocido como Pushover se puede utilizar este objetivo, a través de cálculo de Índices de Daño. En general, se puede definir el daño estructural como un grado de degradación que al final se traduce en la capacidad de una estructura para seguir soportando cargas. Un índice de daño presenta rangos usualmente de 0 a 1, dónde 0 indica que una estructura no ha sufrido daño alguno y que el comportamiento estructural permanece en el rango elástico, en cambio, un valor de 1 representa en la mayoría de los casos un estado de falla o colapso de una estructura.

Para el presente trabajo se aplicaron los siguientes Índices de Daño: *Índice por deflexiones elásticas de piso* (1), *Índice por deflexiones plásticas de piso e Índice basado en deformaciones* (2), *Índice de daño basado en deformaciones o ductilidad* (3) [21] así como la misma restricción de desplazamiento máximo antes del colapso (de tipo CP-Collapse Prevention) propuesto por [17] (4) para determinar si un modelo estructural era potencial para ser considerado como óptimo en el proceso de optimización. De esta manera poder hacer comparaciones directas de resultados en cuanto a desempeño del marco en estudio bajo criterios de diseño de refuerzo donde no se toma en cuenta traslapes y empalmes libres de choques.

$$DI_{drift} = \frac{\Delta_{max}}{H} \quad (2)$$

$$DI_{p,drift} = \frac{\Delta_{max} - \Delta_y}{H} \quad (3)$$

$$DI_{\mu} = \frac{\Delta_{max} - \Delta_y}{\Delta_u - \Delta_y} \quad (4)$$

$$Nivel \rightarrow \{CP - LEVEL\Delta^{CP} \leq 4\%H \quad (5)$$

D. Análisis estático modal

Solo se consideró el primer modo de vibración de la estructura φ_1 de acuerdo con las propiedades dinámicas de la misma (6), donde ω es la frecuencia de la estructura, f_{max} son las fuerzas laterales equivalentes inerciales del sismo y Sa es la aceleración de respuesta máxima del espectro de diseño correspondientes de la **CFE-15** [15] para una *Zona D* de muy alta intensidad sísmica sin considerar efectos de sitio por tipo de suelo.

$$Modal \rightarrow \begin{cases} \det|K - \omega^2 M| = 0 \\ (K - \omega^2 M)[\varphi_i] = 0 \\ |f_{max}| = \left(\frac{\varphi_i^T M^{-1} [1]}{M^*} Sa \right) M \varphi_i \end{cases} \quad (6)$$

E. Diseño de elementos estructurales de concreto reforzado

Los estados límites de diseño y mecanismos tomados para los elementos estructurales que componen a los modelos experimentales del presente trabajo fueron tomados de los códigos **ACI 318** y de las **NTC-17**. A continuación se enlistan de manera resumida. Se consideraron elementos viga, columna, zapatas aisladas y nodos o conexiones viga-columna.

E.1 Vigas

Solo se consideró flexión para el mecanismo de diseño de estos elementos, de modo que una cantidad mínima de acero se coloca en la zona a compresión de las secciones transversales. La profundidad del eje neutro se determina de forma iterativa con el método numérico de raíz (*método de la falsa posición*), tal que la condición $T - C - C_s = 0$ o $\sum_{i=1}^{i=nbars} A_{s_i} E_y \varepsilon_i + \beta_1 c(b) f_c''' = 0$ se cumpla, de acuerdo a la ley de Elasticidad de Hooke sobre distribución lineal de esfuerzos y deformaciones (donde T es la resistencia

del acero de refuerzo a tensión, C es la resistencia del concreto a compresión y C_s es la resistencia del acero de refuerzo a compresión.

E.2 Columnas

Se usa la fórmula de Bresler *método de carga inversa* para reducir el problema biaxial a un solo plano de simetría y computar los *diagramas de interacción* para el cálculo de las resistencias cuando se consideran valores altos de carga axial P_u tal que $\frac{P_u}{P_{oc}} \leq 0.1$ y se pueda calcular la eficiencia estructural como *Efficiency* = $\frac{P_u}{P_{oc}} < 1.0$. Donde P_{oc} es la resistencia neta a compresión de la sección del elemento. Para valores pequeños de la carga axial, se emplea el *método de carga de contorno* con la *ecuación de interacción bidireccional* con la que se calcula la eficiencia estructural como *Efficiency* = $\frac{M_{nx}}{M_{Rx}} + \frac{M_{ny}}{M_{Ry}} \leq 1.0$.

Se consideran efectos de esbeltez para las columnas dado que los modelos estructurales se clasifican como *\textit{no-restringidos}*. Para el cálculo de los momentos amplificados se analizan los modelos estructurales bajo las cargas sísmicas en las dos direcciones laterales, de manera que se determine el máximo desplazamiento de ambos Δ para cada piso, considerando soportes empotrados en cada extremo de las columnas, tomando un factor de esbeltez $k = 0.5$ el cual bastante aceptable para el análisis de efectos de esbeltez.

Dado que los modelos estructurales de experimentación son planos, se considera una excentricidad mínima fuera de plano acorde al código **NTC-17** [14] de $e_{min} = [0.05h > 2cm]$.

E.3 Zapatas aisladas

Se considera un $F.S. = 2.0$ para el cálculo de la capacidad de carga, mediante un mecanismo de carga excéntrica biaxial con una distribución lineal de esfuerzo en la base de las zapatas aisladas en contacto con el suelo tal que $q_{\{real\}} < q_{\{max\}} < q_{\{adm\}}$.

E.4 Nodos viga-columna

Se consideran cuatro tipos de nodos para los marcos planos aquí propuestos **Fig. 3**. Los nodos están clasificados como Tipo 2 de acuerdo con las **NTC-17** [14] para acciones sísmicas, de modo que para cada marco estructural se revisa que cada nodo cumpla con los requerimientos de cortante.

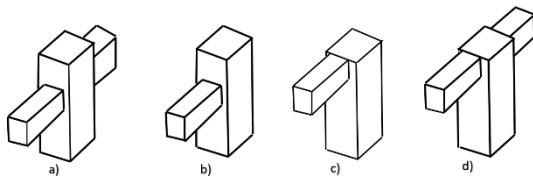


Figura 3: Tipos de nodos considerados para los marcos planos de este estudio: a) Interior, b) Exterior, c) Exterior-Techo, d) Interior-Techo. Tomada de [11].

Para la revisión de las acciones de cortante en los nodos se considera la viga de mayor peralte que llegue a tal nodo y las dimensiones de la columna superior (ya que es la que tendría las dimensiones menores en caso de que hubiera un cambio de sección en las columnas en tal nodo).

F. Restricciones de diseño

Es requerido también tomar mecanismos de diseño para sistemas estructurales más que solo para los elementos que lo componen, de modo que se tomaron restricciones para el diseño marcos estructurales de ductilidad alta acorde a la normativa **NTC-17** [14] con índices de ductilidad $Q = 4$, referentes al criterio *Columna Fuerte, Viga Débil* y

restricciones de dimensionamiento. También se tomaron restricciones de varillado establecidas en el código **ACI-318** [13]. A continuación, se enlistan tales restricciones:

F.1 Vigas

Requerimientos de dimensiones ACI 318-19/NTC-17:

$$b_{\min} = 25\text{cm}, \frac{h}{b} \leq 3, \frac{L}{h} > 4$$

Separación mínima de varillas ACI 318-19/NTC-17:

$$sep_{\min} = \begin{cases} \frac{3}{4}d_{ag} \\ d_{ag} = \frac{3}{4}plg. \end{cases} \quad (7)$$

Área de refuerzo máximo y mínimo ACI 318-19/NTC-17:

$$\frac{0.7\sqrt{f'_c}}{f_y}bd \leq \rho \leq \frac{0.9\sqrt{f'_c}(6000\beta_1)}{f_y+6000} \quad (8)$$

Disposición de varillado ACI 318-19/NTC-17:

Al menos cuatro varillas se deben disponer sobre una sección transversal (una en cada esquina). Cuando se analice y diseñe una viga, se toman tres secciones transversales a lo largo de su longitud (una en cada extremo y una en el centro) de acuerdo con la naturaleza de distribución de flexión en estos elementos.

Requerimientos de ductilidad ACI 318-19/NTC-17:

Se considera una deformación mínima para el acero de refuerzo (grado 42) en tensión de $\epsilon_t = 0.004$ para que se asegure un comportamiento dúctil de los elementos, de acuerdo con el código **ACI 318-19** [13] para vigas dúctiles, tal que la profundidad del eje neutro está limitada por (9):

$$c \geq \frac{d}{\frac{0.003}{0.004} + 1} \quad (9)$$

Y el cálculo de los factores de reducción de resistencia ϕ se determinen como (10):

$$\phi = \begin{cases} 0.65 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{250}{3}\right), & [0.004 \leq \epsilon_t < 0.005] \\ 0.9, & [\epsilon_t > 0.005] \end{cases} \quad (10)$$

F.2 Columnas

Requerimientos de dimensiones ACI 318-19/NTC-17:

$$b_{min} = 30cm, \frac{b}{h} \geq 0.4 \frac{L}{b} \leq 15,$$

$$Ag \geq P_u 0.5f'_c$$

Separación mínima de varillas ACI 318-19/NTC-17:

$$sep_{min} = \begin{cases} \frac{3}{2}d_b \\ \frac{4}{3}d_{ag} \\ 4cm \end{cases} \quad (11)$$

Área de refuerzo máximo y mínimo ACI 318-19/NTC-17:

$$0.01 \leq \rho \leq 0.04 \quad (12)$$

Disposición de varillado ACI 318-19/NTC-17:

Al tratarse de columnas rectangulares se deberán disponer al menos cuatro varillas sobre una sección transversal (una en cada esquina).

Al tratarse de refuerzo simétrico se considera solo un tipo de varilla sobre cada sección transversal.

Requerimientos de ductilidad ACI 318-19/NTC-17:

Se requiere determinar si la sección está controlada a tensión o a compresión, tal que el factor de reducción de resistencia ϕ se calcule como (13):

$$\phi = \begin{cases} 0.75, \dots \dots \dots Tensión \\ 0.9, \dots \dots \dots Compresión \end{cases} \quad (13)$$

Estos factores se aplican a los diagramas de interacción nominales, basándose en la condición balanceada.

F.3 Conexiones viga-columna

- Todas las dimensiones de ancho de las vigas de intersección en un nodo deben ser iguales o menores que las dimensiones de ancho de las columnas en el mismo nodo

- Las dimensiones ancho y peralte de las columnas superiores en un nodo deben ser iguales o menores que las dimensiones de la columna superior en el mismo nodo

F.4 Conexiones columna-zapata

Se considera una relación mínima de dimensiones entre zapata y columna de $B - h_c \geq 60cm$ y $L - b_c \geq 60cm$ para un buen desarrollo del mecanismo de flexión y cortante, donde B es la dimensión de la zapata en-plano con la dimensión más grande de columna h_c , L es la dimensión fuera de plano con la menor dimensión de columna b_c .

F.5 Zapatas aisladas

Para el diseño del acero de refuerzo en cada zapata, se considera cada sección transversal como una viga en la que los esfuerzos a tensión se dan en el borde inferior de las secciones y los esfuerzos a compresión en la parte superior de las secciones. El área de acero a compresión permanece constante durante el diseño tal y como lo enmarca el código **ACI 318-19** [13] tomando en consideración solo el mínimo por temperatura, mientras que el acero a tensión oscila entre las cantidades máximas y mínimas enmarcadas en los códigos de diseño.

Máxima y mínima área de acero ACI 318-19/NTC-17:

$$\frac{0.7\sqrt{f'_c}}{f_y}bd \leq \rho \leq \frac{0.9\sqrt{f'_c}}{f_y+6000}(6000\beta_1) \quad (14)$$

Para el acero en compresión se tomará un mínimo por temperatura de 0.0018.

Disposición de varillado ACI 318-19/NTC-17:

Acorde a lo establecido en el **ACI 318-19** y las **NTC-17** para zapatas aisladas las varillas de refuerzo en la dimensión transversal más larga irán distribuidas de manera no-uniforme con una cantidad de acero en el centro de la sección determinada como $A'_s = \frac{A_s(2B)}{(B+L)}$ y el resto en los extremos como $A''_s = A_s - A'_s$. Solo un tipo de varilla se permite para cada capa de refuerzo horizontal, de modo que hasta dos tipos de varillado pueden ser posibles en una sección y un máximo de cuatro tipos por elemento.

Separación mínima de varillado:

Para este trabajo se consideró una separación mínima de $sep_{min} = 10cm$ debida a practica en su construcción. Además, dados los requerimientos de cortante y presiones de contacto en estos elementos, las dimensiones sin refuerzo suelen proporcionar bastante resistencia a flexión, por lo que usualmente se requieren pocas cantidades de refuerzo en comparación con vigas.

F.5 Criterio columna fuerte – viga débil

De acuerdo con las **NTC-17** para marcos de ductilidad alta se debe cumplir $\sum M_{\{col\}} \geq 1.5\sum M_b$ donde M_{col} es el momento resistente nominal en plano para cada columna que interseca un nodo y M_b es la resistencia nominal de cada viga en el mismo plano que interseca el mismo nodo.

F.6 Diseño óptimo de refuerzo

Los algoritmos y metodologías empleadas en el presente para el diseño óptimo de refuerzo en los elementos estructurales durante el proceso de optimización de los marcos estructurales fueron adaptados de [11] y [15], tanto para vigas, columnas (acero simétrico) y zapatas. A continuación, se presentan los algoritmos para cada tipo de elemento. Para el diseño de acero simétrico en las columnas un método de búsqueda exhaustiva o búsqueda simple de la mejor combinación de acero de refuerzo en una sección en la que solo se permite un solo tipo de varilla.

Algoritmo 2.1: Proceso algorítmico en pseudo-código para la optimización de varillado en secciones de vigas rectangulares

```

1 INICIO
2 1.- Aplicar método de Steepest Gradient Descent para obtener un espesor t óptimo
  (A(t) óptimos para comenzar el proceso)
3 2.- Determinar el número requerido de varillas n para cada uno de los 7 tipos
  disponibles, tal que  $A_{var} \geq A(t)$ 
4 3.- Optimizar el posicionamiento de las barras, sea para varillas en paquetes de 1 o
  2. La restricción  $sep \geq sep_{min}$  se debe cumplir en todo momento
5 4. For i=1 to nTipos-Var=7
6   Verificar si  $sep \geq sep_{min}$  para varillas individuales en una hilera
7 End For
8 Tomar la opción con la mínima área de refuerzo
9 If  $sep \geq sep_{min}$  para cada opción, then:
10 Do
11   Transformar la opción con la mínima área de refuerzo de varillado previamente
  encontrada para un arreglo en una hilera y transformar en paquetes de 2
12 Else  $sep \leq sep_{min}$ 
13   While
14     Incrementar el peralte de la sección  $h = h + 5cm$ 
15   End If
16 FIN
  
```

Algoritmo 2.2: Algoritmo general para el diseño óptimo de varillado simétrico en una sección transversal de columna con un solo tipo de varillado (SGD-1t-ISR-SimpleSearch)

```

1 BEGIN
2 1.- Execute Steepest Gradient Descent method to find t optimum  $A_t$  to begin rebar
  optimization
3 2.- Determine the maximum number of rebars horizontally and vertically for each
  type of rebar
4 For i=1 to n-rebar-types=7
5    $maxRebarHorizontal = \frac{(b-2(cover))+sep_{min}}{sep_{min}+d_b}$ 
6    $maxRebarHorizontal = \frac{(b-2(cover))+sep_{min}}{sep_{min}+d_b}$ 
7   Determine the minimum number of rebars horizontally
8    $minRebarHorizontal = \lceil \frac{1}{2}(n-2(maxRebarHorizontal)) \rceil \geq 2$ 
9   Search over all the possible rebar arrangements
10  For j = minRebarHorizontal to maxRebarHorizontal
11   Evaluate structural efficiency  $Eff < 100\%$ 
12   Evaluate  $cost < cost_{min}$ 
13 End For
14 Save the option with lowest structural efficiency among the most
  economical
15 End For
16 If  $sep \geq sep_{min}$  is not complied for any option, then:
17 The column height is increased  $h = h + 5cm$ 
18 End if
19 END
  
```

Algoritmo 2.3: Proceso algorítmico en pseudo-código para la optimización de varillado en secciones de zapatas rectangulares

```

1 INICIO
2 1.- Aplicar método de Steepest Gradient Descent para obtener un espesor  $t$  óptimo
   ( $A(t)$  óptimos para comenzar el proceso)
3 2.- Determinar el número requerido de varillas  $n$  para cada uno de los 7 tipos
   disponibles, tal que  $A_{var} \geq A(t)$ 
4    $n_{var} = \frac{A(t)}{a_v}$ 
5    $A_{var} = n_{var} a_v$ 
6    $scp_{var} = \frac{a_v b}{A_{var}}$ 
7 3.- Aplicar búsqueda simple para obtener la mejor opción tal que  $A_{var} \rightarrow A_{min}$  y
    $scp \geq scp_{min}$  se cumplan en todo momento
8   Evaluar eficiencia estructural
9   Evaluar costo
10 FIN

```

F.7 Costos de construcción

Los costos de construcción considerados fueron integrados como base de datos del programa presente desarrollado. A continuación, se muestran los desempeños y costos unitarios para cada tipo de elemento.

Vigas:

Dado que hasta un máximo de 9 tipos de varillas pueden estar presentes en un elemento tipo viga, se consideró apropiado tomar un solo Precio Unitario que considerará todos los desempeños de armado para cada tipo de varilla en este tipo de elemento igual a $38.0 \left(\frac{mxn}{Kg}\right)$, como se propuso en [15].

Columnas:

TABLA 1. DESEMPEÑO Y COSTO UNITARIO PARA CADA TIPO DE VARILLA DISPONIBLE CONSIDERANDO REFUERZO SIMÉTRICO EN LAS SECCIONES DE COLUMNAS

Rebar type	Performance Symmetric $\left(\frac{Kg}{Jor}\right)$	Unit cost $\left(\frac{mxn}{Kg}\right)$
4	212	29.19
5	216	29.06
6	220	28.93
8	220	28.93
9	220	28.93
10	220	28.93
12	220	28.93

Zapatas:

Similar a las vigas, en este tipo de elementos se podrían tener varios tipos de varillas por cada elemento (máximo cuatro tipos diferentes) por lo que procedió de igual forma a determinar un solo Precio Unitario que considerará todos los desempeños de armado para cada tipo de varilla en este tipo de elemento igual a $26.75 \left(\frac{mxn}{Kg}\right)$, como se propuso en [15].

Concreto:

Para columnas y vigas se considera bombeado, colado y vibrado del concreto como premezclado y para zapatas se considera Tiro Directo, colado y vibrado con precios unitarios por volumen como se muestra en la **Tabla 2**.

TABLA 2 DESEMPEÑO Y COSTO UNITARIO PARA CADA TIRO DIRECTO Y BOMBEADO DE DIFERENTES TIPOS DE CONCRETO

f'_c	PU tiro directo $\left(\frac{mxn}{m^3}\right)$	PU bombeo $\left(\frac{mxn}{m^3}\right)$
200	2532.14	2525.28
250	2777.96	2845.00
300	2939.12	3010.90
350	3111.50	3188.50

G. Consideraciones de análisis

- El análisis de desempeño por daño se realiza a través de un análisis estático no-lineal tipo Pushover, por cargas monotónicas de sismo provenientes de un análisis modal inicial
- Se considera una condición de degradación de rigidez del sistema de (15) para detener el análisis Pushover

$$\frac{K_j}{K_0} < 0.003 \quad (15)$$

Se consideran Cargas Vivas en las vigas de $LL = \frac{100Kg}{cm}$ de acuerdo con las **NTC-17** con Factores de Carga de 1.1 para todos los tipos de carga (Cargas Muertas, Cargas Gravitacionales, Cargas Vivas y Cargas Accidentales Laterales)

- Se consideró un peso unitario del concreto de $\frac{2400Kg}{m^3}$ y un peso unitario para el acero de refuerzo de $7800 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
- Se utilizó un mecanismo de sección agrietada tanto para columnas como para vigas, a partir de cada propuesta de diseño de refuerzo en cada elemento

H. Criterios de refuerzo por empalmes y traslapes libres de choques

A continuación, se presenta la formulación de los criterios de diseño de refuerzo en los elementos por restricciones de traslapes y empalmes libres de choques. Para el caso de vigas, se hace referencia a conceptos como *nodos iniciales de vigas*, *nodos de vigas intermedias*, *ejes de vigas* y *nodos de vigas únicas* mismos que se pueden apreciar en el *marco tipo* de la **Fig. 4**.

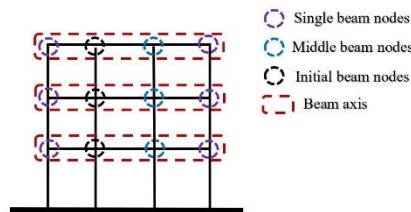


Figura 4: Diagrama de referencia de ubicación de tipo de nodo por eje de viga en un marco estructural.

Así mismo para columnas, se puede tomar referencia al *marco tipo* de la **Fig. 4** para la visualización de *ejes de columnas*, *nodos iniciales de columnas* y *nodos no-iniciales de columnas*.

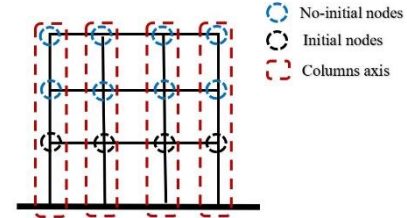


Figura 5: Diagrama de referencia de ubicación de tipo de nodo por eje de columna en un marco estructural.

H.1 Vigas

Nodos de vigas únicas:

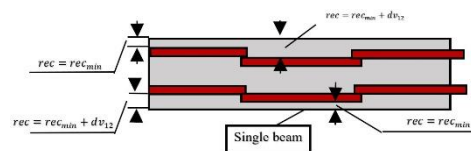


Figura 6: Criterios de refuerzo cuando se trata de una viga singular por piso.

Nodos iniciales de vigas:

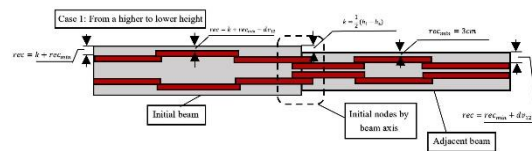


Figura 7: Caso 1 de refuerzo para nodos iniciales de vigas: donde el peralte de la viga inicial es mayor al peralte de la viga adyacente.

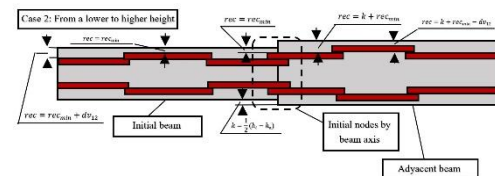


Figura 8: Caso 2 de refuerzo para nodos iniciales de vigas: donde el peralte de la viga inicial es menor al peralte de la viga adyacente.

Nodos no-iniciales de vigas:

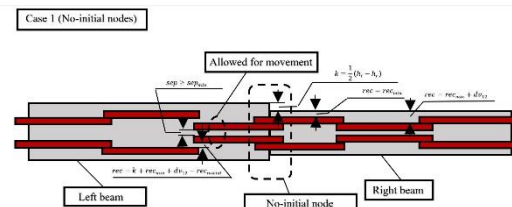


Figura 9: Caso 1 de refuerzo para nodos no-iniciales de vigas: cuando el peralte de la viga de la izquierda es mayor al peralte de la viga de la derecha.

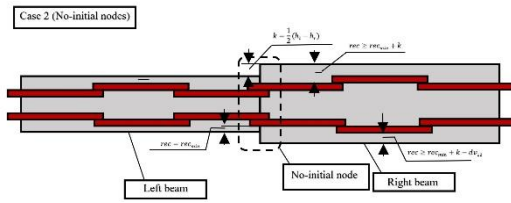


Figura 10: Caso 2 de refuerzo para nodos no-iniciales de vigas: cuando el peralte de la viga de la izquierda es menor al peralte de la viga de la derecha.

H.2 Columns

Nodos iniciales de columnas:

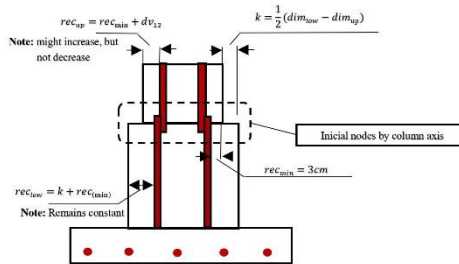


Figura 11: Diagrama de criterios de refuerzo por empalmes y traslapes libres de choques en nodos de columnas de primer piso (nodos iniciales) en un marco estructural.

Nodos no-iniciales de columnas:

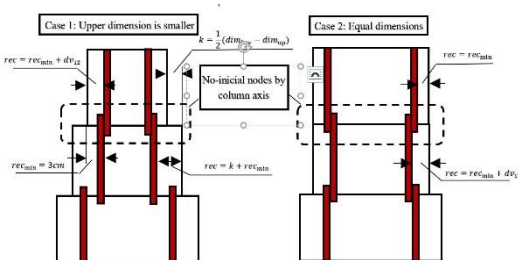


Figura 12: Diagrama de criterios de refuerzo por empalmes y traslapes libres de choques en nodos de columnas de pisos superiores (nodos no-iniciales) en un marco estructural.

1. Proceso de diseño óptimo para marcos planos

1.1 Variables

Para cada algoritmo de optimización las variables se establecieron como los anchos de los elementos b (solo para vigas y columnas) de modo que para ancho de cada elemento b_e se pudiera cambiar la dimensión de altura h_e en caso de que no se cumplieran con las restricciones correspondientes para que dicha sección pudiera resistir sus cargas impuestas (tales como acero máximo y mínimo y separación mínima de varillas). En tal caso, para cada elemento tal dimensión es incrementada en $h \rightarrow h + 5$ indefinidamente hasta que se cumplan todas las restricciones. Para la formulación de optimización se establecieron valores máximos del ancho de las secciones como $b_{max} = 50$ para vigas y $b_{max} = 65$ para columnas.

1.2 Valores y parámetros iniciales

Los parámetros estructurales tales como el $f'_c = 300 \left(\frac{Kg}{cm^2} \right)$ para todos los elementos, $E = 15,000 \sqrt{f'_c}$, coordenadas de nodos (x, y) , longitud de elementos l , tipos de soportes y cargas vivas se establecen inicialmente y permanecen constantes. Por otra parte, cuando se generan los valores iniciales de las variables de ancho b_e en cada elemento de cada marco, se generan automáticamente las dimensiones de altura h_e como $h = b$ para columnas y $h = 2b$ para vigas, mismas que irán modificándose a lo largo del proceso óptimo.

1.3 Optimización mono-objetivo con el PSO

La formulación del proceso de optimización se adaptó de la propuesta hecha en trabajos anteriores (ver [11]). En la **Fig. 13** se muestra el diagrama de flujo del proceso de optimización mono-objetivo empleado, usando el algoritmo PSO.

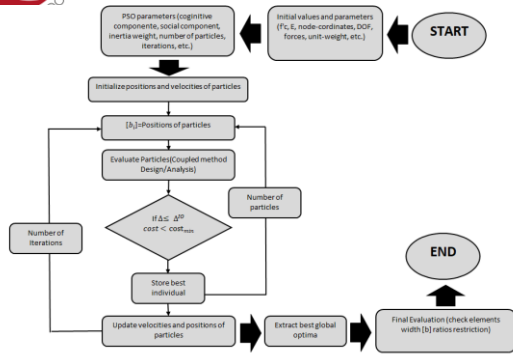


Figura 13: Diagrama de flujo del proceso del proceso de diseño óptimo con el algoritmo de Optimización PSO para marcos estructurales planos. Tomada de [11].

Durante la evaluación de cada partícula (marco) todas las restricciones son revisadas. Después de que se computan los valores iniciales de las variables (dimensiones b_e) se ejecuta un proceso de *uniformidad* que se encarga de cumplir con las restricciones de que las columnas superiores tengan dimensiones de anchos b_e menores o iguales que las columnas inferiores, para cada nodo del marco, y que los anchos de vigas también sean menores o iguales que ambas columnas con que interseca. Una vez que este proceso termine, estas dimensiones de ancho modificadas resultantes en los elementos permanecerán constantes para la revisión de los nodos y del proceso de diseño de varillado. Una vez que termina el proceso de diseño óptimo se ejecuta otro proceso de *uniformidad* para las dimensiones de peralte h_e de las columnas, tal que las columnas superiores tengan dimensiones menores o iguales que las inferiores, como en la dimensión de ancho.

Estos ajustes en las dimensiones iniciales b_e no afectan necesariamente de manera negativa a las convergencias de óptimas (haciendo las variables dependientes una con otra) sino que por el contrario puede ayudar a la convergencia de mejores modelos óptimos al encargarse de que se

cumplan con todas las restricciones de diseño. Las posiciones de las partículas se computan inicialmente como (16) y luego se actualizan en cada iteración como (17) redondeando los valores a múltiplos de 5.

$$b_e = b_{min} + rand_{number}(b_{max} - b_{min}) \quad (16)$$

$$b_e = b_e + v_e dt \quad (17)$$

3. Resultados y discusión

A. Resultados obtenidos sin considerar criterios por traslapes y empalmes

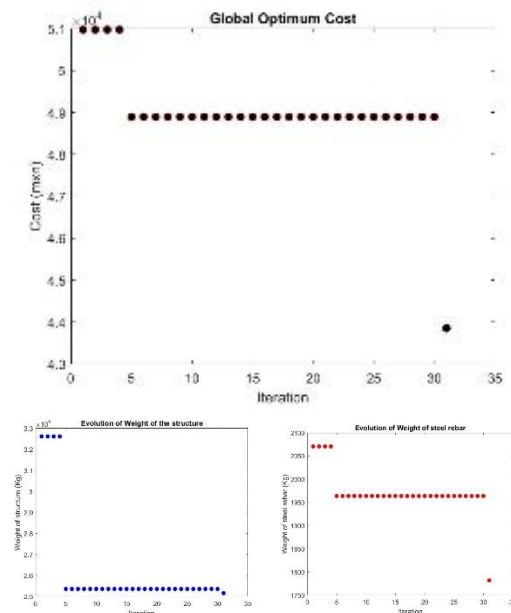
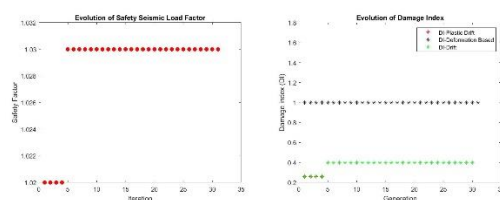


Figura 14: Resultados finales óptimos para el modelo estructural 01, considerando varillado simétrico y agrietamiento en secciones de columnas, usando el algoritmo PSO. Superior-Convergencia de optimización de costo, Izq. Inferior-Evolución del peso total de la estructura, Der. Inferior-Evolución del peso del acero de refuerzo.



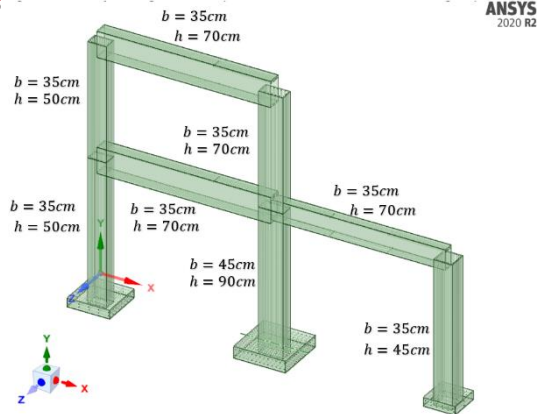


Figura 15: Resultados finales y dimensiones óptimas para el modelo estructural 01, considerando varillado simétrico, con agrietamiento en secciones de columnas, usando el algoritmo PSO. Izq. Superior-Evolución del Factor de Seguridad de prevención al colapso contra cargas sísmicas, Der. Superior-Evolución de los índices de Daño, Inferior-Dimensiones óptimas de los elementos del Marco.

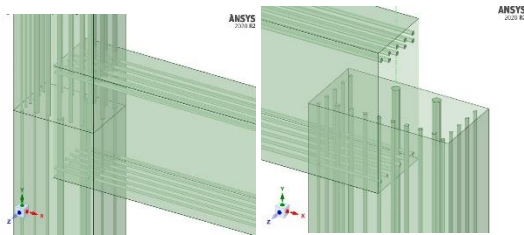


Figura 16: Resultados visuales de refuerzo sin considerar criterios por empalmes y traslapes libres de choques.

B. Resultados obtenidos considerando criterios por traslapes y empalmes

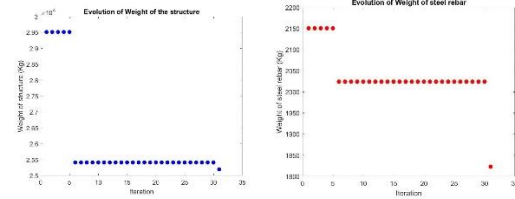
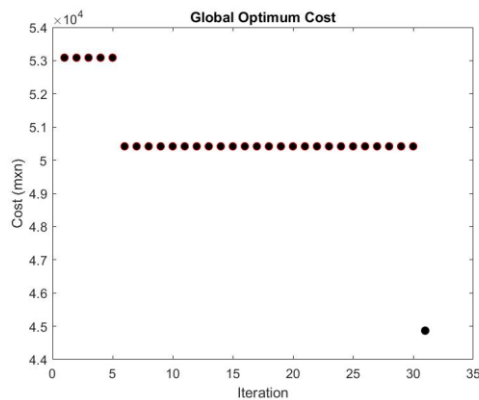


Figura 17: Resultados finales óptimos para el modelo estructural 01, considerando varillado simétrico, con agrietamiento en secciones de columnas, considerando criterios de refuerzo por traslapes y empalmes libres de choques, usando el algoritmo PSO. Superior-Convergencia de optimización de costo, Izq. Inferior-Evolución del peso total de la estructura, Der. Inferior-Evolución del peso del acero de refuerzo.

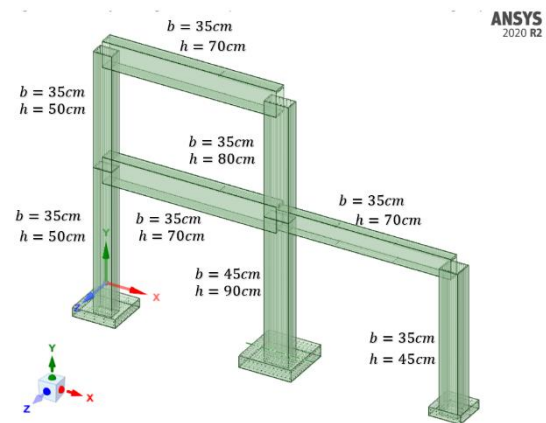
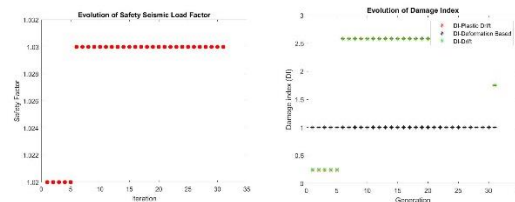


Figura 18: Resultados finales y dimensiones óptimas para el modelo estructural 01, considerando varillado simétrico, con agrietamiento en secciones de columnas, considerando empalmes y traslapes libres de choques, usando el algoritmo PSO. Izq. Superior-Evolución del Factor de Seguridad de prevención al colapso contra cargas sísmicas, Der. Superior-Evolución de los Índices de Daño, Inferior-Dimensiones óptimas de los elementos del Marco.

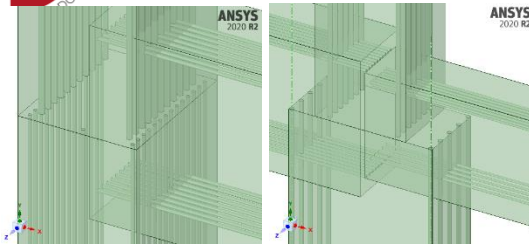


Figura 19: Resultados visuales de refuerzo considerando los criterios por empalmes y traslapes libres de choques aquí propuestos.

C. Resumen de resultados

TABLA 3 RESÚMEN DE RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN CON ACERO SIMÉTRICO PARA EL MODELO MARCO 01, USANDO EL PSO.

Experiment	Optimal Cost (MXN)	Structure weight (Kg)	Steel Rebar weight (Kg)	Safety Factor	DI-Drift	DI-Deformation	DI-Plastic Drift
Symmetric Reinforcement - Cracked Col Sections without Free-clash criteria	43,854	25,155	1,781.8	1.03	1.676	1.668	1.0
Symmetric Reinforcement - Cracked Col Sections with Free-clash criteria	44,867	25,197	1,822	1.03	1.759	1.746	1.0

Se puede observar a partir de la **Tabla 3** que las estructuras óptimas tienden a ser un poco más robustas, aunque la diferencia suele ser mínima, lo que garantiza una mayor seguridad a que las dimensiones de los elementos cumplan con los requerimientos que se tendrán en el sitio de construcción por colocación del refuerzo, de acuerdo con recubrimiento y separación mínima, (ver **Fig. 15 Fig. 18**). Además, los detallados que se obtienen una vez terminado el diseño óptimo son de muy buena calidad para ser usados en los planos de construcción (ver **Fig. 19**).

D. Comentarios adicionales y recomendaciones

- Se podría recomendar en investigaciones futuras que se calcularan cortes y longitudes de traslapes, de esta manera hacer comparaciones en costos y peso de

acero de refuerzo que cuando no se toma en cuenta. Es decir, ver el grado de sensibilidad de considerar este factor contra no hacerlo

- El considerar en el diseño el acero a cortante podría tener también influencia en la convergencia de las óptimas, tanto en peso, costo como considerar la resistencia adicional por cortante y torsión. Además, se obtendría resultados de detallado más completos
- Se podrían aún integrar más criterios de diseño por empalmes y traslapes libres de choques en las uniones columna-viga, aunque no sería nada sencillo integrarlo al proceso de diseño óptimo, mejorarían bastante las calidades de los detallados finales
- Otra experimentación posible como estudio comparativo es la de simulaciones de procesos óptimos de diseño considerando un el mecanismo de la sección transformada agrietada para columnas a partir de la sección con el perfil idealizado ISR y sin considerar tal mecanismo; ya que la diferencia en los momentos de inercia entre una consideración y otra en las columnas generan distribuciones totalmente diferentes de elementos mecánicos, aspecto que usualmente se ignora en los procesos de optimización

4. Conclusiones

- Con los criterios aquí propuestos se obtienen estructuras de tan solo 2% más pesadas y más costosas que sin considerar dichos criterios, lo que le añade a las estructuras mayor seguridad en los diseños sin realmente grandes incrementos en las dimensiones de los elementos, aunque esta variación en

dimensiones de cada elemento si puede cambiar considerablemente a partir de un enfoque a otro debido a los requerimientos particulares de cada elemento para distribuir el varillado sin que choque con el de los elementos adyacentes; esto puede significar una redistribución completamente diferente de los esfuerzos entre cada elemento del sistema estructural, que valdría la pena tomar en cuenta en estructuras importantes

- Se pone de manifiesto que cada vez se pueden integrar y tomar en cuenta más criterios de diseño y análisis con lo que se generen modelos numéricos estructurales y análisis-diseños mismos más confiables y precisos, que asemejen en la medida de lo posible lo que realmente se tiene en el sitio de construcción. Esto significa un avance más en la tecnología de Inteligencia Artificial aplicada al diseño de infraestructura civil, en donde los sistemas autónomos son cada vez más comunes

5. Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Jaime Moisés Horta y asesores por el apoyo y consejos brindados.

6. Fuentes de financiamiento

Este proyecto fue posible gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de una beca para el programa de Posgrado Maestría en Ciencias de las Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

7. Referencias

- [1] M.Afzal, Y. Liu, Jack C.P. Cheng, V. Gan, "Reinforced concrete structural design optimization: A critical review", Journal of Cleaner

- Production, no. 260,2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623>
- [2] Herlan Al. Leyva, Eden Bojórquez, Juan Bojórquez, Alfredo Reyes-Salazar, José H. Castorena, Eduardo Fernández and M.A. Barraza, "Earthquake Design of Reinforced Concrete Buildings Using NSGA-II, Advances in Civil Engineering", 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5906279>
- [3] A.Negrín, E. Chagoyén, "Optimización metaheurística de conjuntos estructurales de hormigón armado", Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba. Spanish; 2019
- [4] Vincent J.L.Gan, C.L.Wong, K.T.Tse, Jack C.P.Cheng, Irene M.C.Lo, C.M.Chan, "Parametric modelling and evolutionary optimization for cost-optimal and low-carbon design of high-rise reinforced concrete buildings", Journal of Advanced Engineering Informatics, no. 42, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100962>
- [5] X.K.Zou, C.M.Chan, G.Li and Q.Wang, "Multiobjective Optimization for Performance-Based Design of Reinforced Concrete Frames", Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol.133, no. 10, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:10(1462)
- [6] Siamak Talatahari, "Optimum performance-Based Seismic design of frames using meta-heuristic optimization algorithms", Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures Journal, pp. 419-437, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398364-0.00017-6>
- [7] Chunyu Zhang, Ying Tian, "Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings", Engineering Structures, Vol.185, pp. 15-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.108>
- [8] Eleftheriadis S., Duffour P., Stephenson B., Mumovic D., "Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors", Autom..ConStruct. no. 96, pp. 366-377, 2018.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>
- [9] Zahra S. Moussavi, Ahmed W.A.Hammad, J. Xiao, Ali Akbarnezhad, "Minimizing cutting wastes of reinforcing steel bars through optimizing lap splicing within reinforced concrete elements", Journal of Construction and Building Materials, no. 185, pp. 600-608, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.023>
- [10] A.Akin, M.P.Saka, "Harmony search algorithm based optimum detailed design of reinforced concrete plane frames subject to ACI 318-05 provisions", Computers and Structures, no. 147, pp. 79-95, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.10.003>
- [11] L.F.Verduzco, J.Horta, M.A.Pérez Lara y Hernández, J. Bosco, "Performance-Based Optimization of Reinforced Ductile Concrete Frames with Asymmetric Reinforcement in Columns Using the ISR Analogy", Current Journal of Applied Science and Technology, Vol.40, no. 21, pp. 32-60, 2021. DOI: 10.9734/CJAST/2021/v40i2131469

- [12] E. Muttio, S. Botello and M. Tapia, "Modelado paramétrico mediante programación visual en el diseño y análisis estructural de edificios, Revista Mexicana de Métodos Numéricos", Vol. 1, 2017. Disponible: https://www.scipedia.com/public/Muttio_et_al_2017a
- [13] American Concrete Institute ACI 318, "Building Requirements for structural concrete and commentary", 2019
- [14] Gaceta Oficial de la Ciudad de México, "Normas Técnicas Complementarias". Spanish; 2017. Available: <https://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.php>
- [15] L.F.Verduzco, J. Horta, "Optimization of reinforced concrete structures with the ISR analogy", XVII International Engineering Congress (CONIIN-21), Universidad Autónoma de Querétaro, Revista del Congreso Internacional de Ingeniería (CONIIN), 2021 (in press)
- [16] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES", CAPÍTULO C.1.3 DISEÑO POR SISMO, MÉXICO. Spanish; 2015
- [17] FEMA 273, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of Buildings", NEHRP, 1997
- [18] P.Sharafi, Muhammad N.S. Hadi and Lip H. Teh, "Cost Optimization of Column Design of Reinforced Concrete Buildings, Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures", pp. 129-146, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398364-0.00006-1>
- [19] L. Verduzco Martínez and A. Hernández-Martínez, "Optimization of reinforcing steel for the design of concrete columns", Bachelor Thesis, University of Guanajuato, Mexico, 2019. Available: <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/2684>
- [20] L. Verduzco Martínez, "The Idealized Smeared Reinforcement (ISR) method for the optimization of concrete sections: a survey of the state-of-the-art and analysis of potential computational approaches", Revista Mexicana de Métodos Numéricos. Vol. 5, no. 1, 2021. DOI: https://www.scipedia.com/public/Verduzco_Martinez_2021a
- [21] D.A.Makhloof, A.R.Ibrahim, Xiaodan Ren, "Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures through Damage Indices: A State-of-the-Art Review", Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 128, no. 3, 2021. DOI: doi:10.32604/cmescs.2021.016882