



SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES

La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

Optimization as a tool to improve the sustainability indexes of RC structures

Iván A. Negrin Diaz¹, Ernesto L. Chagoyén Méndez²

1- Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail: indiaz@uclv.cu

2- Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail: chagoyen@uclv.edu.cu

Resumen: La mejora de los índices de sostenibilidad de las obras de ingeniería civil es una búsqueda constante por parte de investigadores y proyectistas a nivel mundial. La creación de nuevos materiales de construcción y la optimización estructural son las dos principales vías de lograr este objetivo. En este trabajo se ofrecen alternativas, basadas en la optimización estructural utilizando meta-heurísticas, para lograr diseños sostenibles (económicos, respetuosos con el medio ambiente, duraderos) de estructuras de hormigón armado. Se ofrecen algunos resultados obtenidos al aplicar las estrategias propuestas a diferentes casos de estudio. Además, se hace un análisis sobre nuevas alternativas para aumentar aún más el índice de sostenibilidad de dichas estructuras.

Abstract: *Improving the sustainability indexes of civil engineering works is a constant quest of researchers and designers worldwide. The creation of new building materials and structural optimization are the two main ways to achieve this goal. This paper offers alternatives, based on structural optimization using meta-heuristics, to achieve sustainable designs (economical, environmentally friendly, durable) of reinforced concrete structures. Some results obtained by applying the proposed strategies to different case studies are given. In addition, an analysis is made on new alternatives to further increase the sustainability indexes of such structures.*



Palabras Clave: diseño sostenible; estructuras de hormigón armado; optimización estructural; función objetivo; restricciones

Keywords: *sustainable design; reinforced concrete structures; structural optimization; objective functions; constraints*

1. Introducción

La optimización de estructuras es un tema de gran relevancia en el contexto actual del diseño estructural, en orden de minimizar los costos de construcción y el uso de los materiales, entre otros objetivos en función del correspondiente impacto ambiental. La optimización del diseño de estructuras de hormigón armado (HA) es más compleja que otros tipos de estructuras (como las de acero), debido a algunas particularidades, como por ejemplo, la anisotropía del HA como material de construcción y su efecto en el comportamiento estructural (Negrin et al, 2021b).

El objetivo de optimización más utilizado es el económico. Sin embargo, debido al gran impacto del sector de las construcciones en el medio ambiente, especialmente las estructuras de HA, otros objetivos han surgido en los últimos años. Objetivos medioambientales han sido ampliamente aceptados e implementados por parte de la comunidad científica mundial (Negrin et al, 2021c). Es bien sabido que el sector de la edificación y la construcción representa la mayor parte de la utilización de recursos naturales por el uso del suelo y la extracción de materiales (Yeo y Gabbai, 2011). El impacto de las estructuras de HA en el medio ambiente es significativo y ha aumentado año tras año (De Medeiros y Kripka, 2014). La producción mundial de cemento, principal componente del hormigón, alcanzó los 1.600 millones de toneladas/año en 2001, lo que corresponde aproximadamente al 7% de la carga global de dióxido de carbono (CO₂) liberada a la atmósfera (De Medeiros y Kripka, 2014) (Bremner, 2001) (Intercement. Annual Report, 2010). En 2010, según la International Cement Review, la producción mundial de cemento se situó en torno a los 3.300 millones de toneladas/año, lo que supone un incremento de más del 100% en casi 10 años y ha aumentado aún más su impacto en el medio ambiente (Intercement. Annual Report, 2010). Por otra parte, los edificios de todo el mundo son responsables de entre el 25% y el 40% del uso total de energía (IEA, 2005). En la actualidad, la mayoría de los esfuerzos para reducir las emisiones de CO₂ durante la vida útil de un edificio se centran en reducir la energía



Convención CCI-UCLV 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

necesaria para su funcionamiento y mantenimiento (Yeo y Gabbai, 2011). Por estas razones, elementos como las emisiones de CO₂ (De Medeiros y Kripka, 2014) (Payá et al, 2009) (Camp y Huq, 2013) (Kaveh, 2017) (Negrin et al, 2021c) o la energía total incorporada (EE) (Yeo y Gabbai, 2011) (De Medeiros y Kripka, 2014) (Negrin et al, 2021c) de las estructuras de HA se han utilizado como objetivo en los problemas de optimización del diseño.

En el caso de estas estructuras, la reducción de las emisiones de CO₂ o de la EE puede lograrse no sólo mediante el uso de nuevos materiales de construcción, como los cementos bajos en carbono y los sustitutos del clinker (Davidovits, 1993) (Gartner, 2004) (WBCSD-IEA, 2009), y el reciclaje (Thormark, 2002), sino también mediante el uso más eficiente de los materiales de construcción resultante de la optimización de su diseño (Yeo y Gabbai, 2011). Sin embargo, hay regiones (principalmente las no desarrolladas) en las que es imposible obtener datos fiables sobre estos valores de entrada. Además, algunos estudios han constatado que la parte de la energía incorporada en el ciclo de vida total puede ser tan baja como el 5% y tan alta como el 40% (Sartori y Hestnes, 2007), y la variación significativa se debe en gran parte a que la EE varía de un país a otro (Yeo y Gabbai, 2011). También ocurre con otros temas como las emisiones de CO₂. Además, en estas regiones poco desarrolladas apenas se aplican técnicas de optimización del diseño. El "know-how" de estos procedimientos suele ser desconocido, y el uso de recomendaciones de diseño es el único enfoque disponible para conseguir diseños más sostenibles. Sin embargo, si no se dispone de bases de datos, es muy difícil estudiar algunos casos y obtener dichas recomendaciones. Por lo tanto, es imperativo comenzar a desarrollar estudios para actualizar los bancos de datos y las soluciones para conseguir índices fiables y sostenibles en el sector de la construcción (Negrin et al, 2021c).

En este trabajo se exponen algunos resultados de aplicar procesos de optimización del diseño a estructuras aporricadas de HA, sirviendo estos como recomendaciones de diseño para mejorar los índices de sostenibilidad de estas estructuras. Aspectos como la solución práctica de los problemas en cuestión (elementos diseñados con dimensiones constructivas y distribución real del acero de refuerzo, con corte y despiezo incluido) y la interacción-suelo estructura, son desarrollados en estos trabajos. La inclusión de estos



aspectos representa un salto cualitativo en la formulación de estos procesos, ya que los resultados demuestran que su inclusión influye significativamente en estos.

En el siguiente capítulo se explica la formulación matemática de estos problemas de optimización. En el capítulo 3 se exponen las alternativas empleadas para incluir los aspectos usualmente ignorados por proyectistas e investigadores. Finalmente, se muestran los resultados, realizando un enfoque de cómo se pueden superar ciertas limitaciones y proponiendo ideas para esto.

2. Formulación matemática del problema de optimización

La formulación matemática del problema de optimización es un paso sumamente importante. Aquí se definen las variables, la o las funciones objetivo, las restricciones, y los parámetros asignados, asociado con el caso de estudio a ser optimizado.

2.1 Función objetivo

Las funciones objetivo miden cuantitativamente cada una de las posibles soluciones. Así, en un problema de optimización, el objetivo es maximizarlas o minimizarlas (Negrin et al, 2019a) (Negrin et al, 2019b) (Negrin et al, 2021a) (Negrin et al, 2021b) (Negrin et al, 2021c). Como se ha mencionado, en los últimos años se han propuesto otros objetivos para lograr estructuras más económicas, respetuosas con el medio ambiente, fáciles de construir y duraderas.

2.1.1 Criterio económico

El criterio económico es el más utilizado. En nuestras investigaciones, la función objetivo costo económico incluye los costos directos de encofrado, del acero (incluyendo la elaboración, el montaje y la colocación) y del hormigón (incluyendo la elaboración y la colocación) (Negrin et al, 2019a) (Negrin et al, 2019b) (Negrin et al, 2021c). Además, en el caso de las cimentaciones, se incluye el costo de excavación y rehinchó (Negrin et al, 2021a) (Negrin et al, 2021b). Para información detallada consultar la bibliografía expuesta.

2.1.2 Criterio medioambiental

Como se ha mencionado, para tener en cuenta el criterio ambiental se incluyen objetivos relacionados con las emisiones de CO₂ y la EE. Estos implican las mismas actividades que los datos de entrada del coste económico. Los valores de EE se obtienen incluyendo las fuentes (adquisición de materias primas), el transporte, el proceso (fabricación) y las etapas del ciclo de vida de distribución. La EE de los materiales de construcción



individuales se utiliza para cuantificar este capital energético ascendente. Además del uso de la energía previa, la EE también tiene en cuenta la energía utilizada durante la construcción in situ y la energía utilizada en la sustitución de materiales y componentes durante la vida útil del edificio (Yeo y Gabbai, 2011). También tiene en cuenta la energía utilizada para la demolición (Yohanis y Norton, 2002). Por su parte, los valores de emisión de CO₂ engloban el uso de materiales que implican emisiones en las distintas fases de producción y colocación. Cuanto mayor sea este valor, menor será su sostenibilidad (Payá et al, 2008).

2.1.3 Criterio constructivo

El criterio constructivo tiene como objetivo hacer que el diseño sea más fácil de ejecutar. Se puede argumentar que la optimización basada únicamente en el coste suele dar lugar a estructuras cuya constructibilidad está mal tratada, porque los resultados tienden a arreglos con demasiados diámetros diferentes y barras de pequeño diámetro poco espaciadas. En este sentido, el número de barras se considera un indicador de constructibilidad, ya que menos barras implican diámetros mayores con mayor espaciamiento. Además, menos barras implican menos errores de ejecución, un control de calidad menos complejo y procesos de construcción más rápidos. Por supuesto, este criterio se tiene que tener en cuenta utilizando disposiciones prácticas de las armaduras y garantizando que el espaciado de las barras satisface las distancias mínimas del código de prácticas (Payá et al, 2008). Por tanto, se puede expresar como función objetivo el número total de barras de refuerzo que utiliza la estructura, vinculado con el número de diámetros diferentes que ofrece la solución final.

2.1.4 Criterio de durabilidad

Este criterio es extremadamente importante para estructuras ubicadas en ambientes muy agresivos, ya que, aun cuando se aplique una estrategia de optimización, persiguiendo cualquiera de los objetivos anteriormente planteados, la solución obtenida puede no ser una buena solución desde el punto de vista de durabilidad, aun cuando cumpla criterios establecidos en la normas. Esto puede desencadenar un deterioro prematuro de la estructura, acarreando la necesidad de mantenimiento extra, invalidando todo el esfuerzo inicial para obtener una estructura óptima.

Una forma de medir durabilidad bastante sencilla pudiera ser disminuyendo la abertura de grieta. Es decir, cada solución de acero de refuerzo traerá una correspondiente

abertura de grieta, por lo que se puede escoger una buena solución, la cual puede incluso no ser la óptima, y que se corresponda con un diseño que garantice una abertura de grieta mínima, aumentando significativamente la durabilidad de la estructura, a costa de un pequeño aumento del costo directo de construcción, u otros índices medioambientales.

Existen otras metodologías mucho más complejas, que incluyen además la selección, o el diseño de mezclas de hormigón. En (García Segura et al, 2017) se propone como criterio de durabilidad, maximizar el tiempo de inicio de la corrosión en puentes ubicados en zonas costeras, además del objetivo económico y el de seguridad. Este inicio de la corrosión depende de muchos factores, como la concentración de cloruro en la superficie o el coeficiente de difusión aparente, que a su vez depende de otros muchos aspectos, como la densidad de la masa del cemento o de los áridos, la relación agua-cemento o cemento-agregado, entre otros.

2.2 Variables

Las variables en estos problemas de optimización suelen ser las dimensiones de las secciones transversales (ver Fig. 1a), las propiedades de los materiales, la rectangularidad para cimentaciones superficiales (ver Fig. 2b) o la solución (número, tipo de barras y su distribución) del acero de refuerzo. Esta última variable es esencial para medir criterios constructivos y de durabilidad. En la sección donde se explican las futuras líneas de investigación, se introducen posibles nuevas variables para aumentar la eficiencia del problema de la optimización del diseño de estas estructuras.

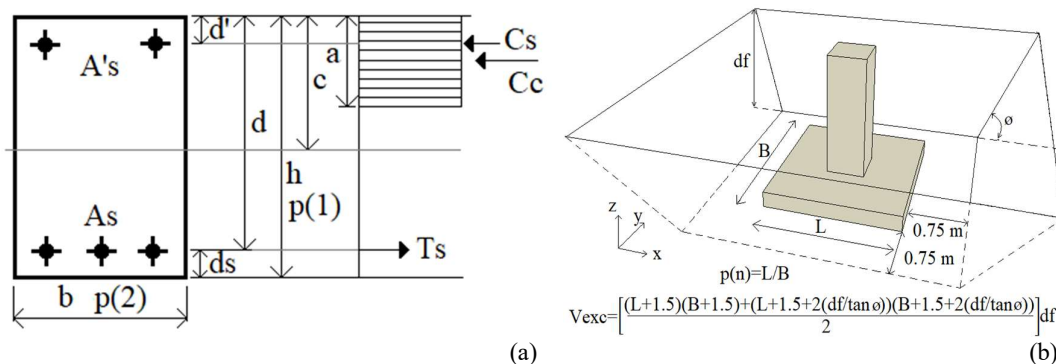


Figura 1. Ejemplos de variables en los problemas de optimización en cuestión, (a) dimensiones de las secciones transversales (h ó p(1) y b ó p(2)) y (b) rectangularidad (p(n)) en cimentaciones superficiales (Negrin et al, 2021b)



2.3 Restricciones

Las restricciones se basan en todas las condiciones que se deben cumplir para que el diseño sea correcto (Negrin et al, 2021b).

Definimos dos tipos de restricciones. En primer lugar, tenemos las *restricciones de diseño* (explícitas). Se imponen directamente a las variables de diseño y aparecen por diversas razones: edificabilidad, funcionalidad, transporte o estética, etc., y se presentan como $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$. Además, tenemos las *restricciones de comportamiento* (implícitas). A veces se denominan ecuaciones de estado y son indirectas. Estas restricciones tratan del cumplimiento de los estados límite, es decir, definen los valores que deben cumplir los parámetros variables para satisfacer los requisitos de comportamiento. En la optimización estructural, las restricciones de comportamiento suelen establecerse mediante normas de diseño, por ejemplo, las tensiones/desplazamientos máximos admisibles, la anchura de las grietas o las deformaciones. En última instancia, estas ecuaciones de estado gobiernan el propio diseño y son más complejas que las demás restricciones (Negrin et al, 2021b) (Negrin et al, 2021c).

2.4 Parámetros asignados

Los parámetros asignados son todos aquellos que se mantienen constante en el problema de optimización, por lo que vienen siendo los términos opuestos a las variables. Estos dependen del caso de estudio utilizado (altura de los niveles, longitud de luces e intercolumnios, cargas, etc.). Un ejemplo claro puede ser si se pone la resistencia característica del hormigón fija ($f'c=25$ MPa, por ejemplo) es un parámetro asignado, mientras que si puede variar ($f'c=[25, 30, 35$ o 40 MPa]) se convierte en una variable del problema.

2.5 Métodos de solución al problema de optimización

Es bien conocido que debido a las características de los problemas de optimización estructural (variables discretas, presencia de muchos óptimos locales, etc.), las (meta)heurísticas son las estrategias más utilizadas para darle solución. Los métodos clásicos presentan limitaciones que les impiden dar soluciones competentes comparadas con las obtenidas por procedimientos estocásticos.

Nuestro grupo de investigación ha testeado y mejorado varias de estas estrategias a través de hibridaciones (Negrin et al, 2019a) (Negrin et al, 2019b) o de procedimientos



de ajustes de parámetros (Negrin et al, 2020) (Negrin et al, 2021a) (Negrin et al, 2021b). En estos estudios se ha destacado el uso de una meta-heurística de relativo poco conocimiento y aplicación: la Optimización Basada en Biogeografía (BBO por sus siglas en inglés), una estrategia evolutiva que ha superado en rendimiento a otras estrategias clásicas como Algoritmos Genéticos (GA) u Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).

3. Aspectos usualmente ignorados (simplificaciones) en problemas de optimización

Por otra parte, resulta frecuente encontrar en la literatura casos de estudio con muchas simplificaciones. El estudio de elementos aislados (Malasri et al. 1994) (Yeo y Gabbai, 2011) (De Medeiros y Kripka, 2016) (Afshari et al. 2019) es bastante común, aunque se deja de tener en cuenta un aspecto de vital importancia como la redistribución de solicitaciones en estructuras cinemáticamente indeterminadas, es decir, en las estructuras reales, la rigidez de un elemento no solamente lo afecta a el mismo, sino a todos los conectados a él, y la función objetivo refleja significativamente esta interacción (Negrin et al, 2021b).

Otro tipo de casos de estudio muy frecuente son las estructuras planas (Payá et al, 2008) (Yeo y Potra, 2015) (Serpik et al., 2016) (Guerra y Kiousis, 2006) (Negrin et al, 2019b). Aquí se tiene más en cuenta el concepto de conjunto estructural previamente explicado, pero tienen la gran limitación de que no se considera el carácter tridimensional de las estructuras reales, limitando el alcance de los resultados.

3.1 Interacción suelo-estructura

Un elemento generalmente ignorado es la interacción suelo-estructura (ISE), siendo esta extremadamente influyente en los resultados del análisis y diseño de estructuras aporcadas fundamentalmente (Negrin et al, 2019a) (Negrin et al, 2021a) (Negrin et al, 2021b).

Nuestro grupo de investigación ha propuesto una metodología basada en la hipótesis de Winkler (Negrin et al, 2021a) (Negrin et al, 2021b) para incluir este aspecto en los procedimiento de modelación de los problemas de optimización. A continuación se muestra la metodología y los conceptos fundamentales que envuelve nuestra propuesta, como se establece en (Negrin et al, 2021b).

Al considerar el SSSI en el problema de optimización estructural, tenemos en cuenta el hecho de que una estructura, sobre el suelo subyacente, se deforma bajo carga-descarga,



lo que produce una redistribución de fuerzas en la superestructura, es decir, el SSSI afecta a las respuestas de todo el sistema durante los procesos de carga-descarga. Para incorporar el SSSI, se supone que el suelo está estratificado con propiedades materiales constantes a lo largo de su profundidad y se modela como un semiespacio linealmente elástico, considerando la limitación de la profundidad del espesor compresible, mientras que la cimentación se considera como una zapata de placa (poco profunda).

En los cálculos prácticos, la consideración de la no linealidad se introdujo en el cálculo de los asentamientos en suelos colapsables de tipo II (Klepikov et al. 1987), pero el modelo utilizado para ello (Klepikov 1969) puede adaptarse y ampliarse a otros tipos de suelo y tipologías de cimentación, como los suelos predominantemente friccionales, en los que la diferencia entre la tensión límite de linealidad (R^*) y la capacidad de carga base (q^*_{br}) es mayor. Por lo tanto, la incursión en la etapa no lineal del comportamiento del suelo tiene más sentido en el diseño geotécnico de cimentaciones poco profundas.

Aproximando la relación entre la presión actuante y el asentamiento (p vs. S) para una cimentación poco profunda que descansa sobre una base de suelo, mediante una ecuación hiperbólica, Klepikov (1969) definió la relación como se muestra en la Ecuación 1, donde p es la presión actuante de la cimentación y \bar{S} es el asentamiento de la base para una presión actuante igual a la tensión límite de linealidad de la base del suelo R^* . Se observa aquí, que la Norma Cubana para el diseño de cimentaciones superficiales, asume el enfoque semiprobabilístico de diseño de estados límite (DEL). Durante el diseño de la cimentación se consideran dos estados límite (EL): el primero rige el diseño de la capacidad portante de la cimentación, mientras que el segundo EL, rige el comportamiento del suelo (lineal o no lineal) durante el cálculo de los asentamientos y los métodos para tales determinaciones.

$$S = \frac{p \cdot \bar{S} \cdot \left(\left(\frac{q^*_{br_II}}{R^*} \right) - 1 \right)}{q^*_{br_II} - p} \quad (1)$$

La Norma Cubana recomienda la ecuación de Brinch-Hansen (Hansen 1970) para la determinación de $q^*_{br_II}$, con c la cohesión del suelo, ϕ el ángulo de fricción del suelo y γ el peso específico del suelo como parámetros.

La curva "presión-asentamiento" pasa por el punto con coordenadas (R'^*, \bar{S}) y se acerca ilimitadamente a la asíntota $p = q^* br_{II}$ (Fig. 2a).

Los parámetros que describen el diagrama no lineal se determinan por los métodos clásicos de la mecánica del suelo, basados en la teoría de la plasticidad y la elasticidad, considerando las dimensiones y la profundidad de los cimientos, y las propiedades físicas y mecánicas de la base del suelo. La relación dada por la Ecuación 1, además de su simplicidad, tiene la ventaja de que permite, mediante una única curva, describir el comportamiento lineal e incluso no lineal del suelo, hasta la capacidad portante de la cimentación, basándose en un conjunto de parámetros y conceptos de cálculo del suelo que son familiares para los proyectistas.

En el proceso de diseño de la cimentación, los asentamientos y presiones de la misma se determinan, según la Norma Cubana (ONN (NC) 2014), en el llamado "punto característico" de la cimentación, es decir, un punto en el que el asentamiento permanece igual para una cimentación rígida y para una cimentación flexible de las dimensiones consideradas, de manera que el coeficiente de rigidez de la base del suelo que se obtiene es también independiente de la rigidez de la cimentación, que se desconoce durante el análisis estructural (ver Fig. 2b).

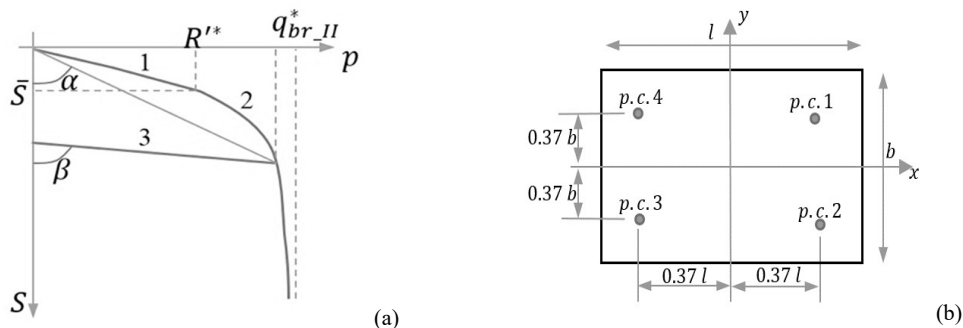


Figura 2. (a) Determinación del coeficiente de rigidez en la base no linealmente deformable (Klepikov et al. 1987): diagrama de cálculo de las deformaciones de la base, (b) puntos característicos en cimentaciones superficiales rectangulares, según la Norma Cubana (ONN (NC) 2004)

3.1.1 Algoritmo para incorporar la ISE

Se elaboró un procedimiento para resolver el problema de contacto no lineal en suelos colapsables utilizando el modelo de coeficiente de rigidez variable, suponiendo que las dimensiones de la cimentación son conocidas (Klepikov et al. 1987), o cuando se fijan



de alguna manera por ciertos criterios. Sin embargo, estas dimensiones se desconocen inicialmente.

Cuando se considera el SSSI en el caso de cimentaciones poco profundas, el cálculo comienza analizando un modelo con apoyos clásicos idealizados.

A partir de los resultados del primer paso, se realiza el diseño geotécnico, se calculan las dimensiones de los cimientos y se realiza también el diseño estructural, del que sólo se requiere en este paso el espesor de la losa de la cimentación poco profunda. Con estos resultados se completa el modelo anterior con la cimentación, considerando sus dimensiones en el paso anterior, los coeficientes de rigidez que permiten un análisis con SSSI, determinando el coeficiente de rigidez, para la i -ésima cimentación según la siguiente expresión:

$$k_i^{(1)} = \frac{q_{br_IIi}^{*(1)} - P_i^{(1)}}{\bar{S}_i^{(1)} \cdot \left[\left(\frac{q_{br_IIi}^{*(1)}}{R_i^{w(1)}} \right) - 1 \right]} \quad (2)$$

donde el superíndice (1) representa el paso de iteración (primer paso).

A continuación se lleva a cabo el análisis del modelo con la consideración del SSSI, lo que conduce a nuevos valores de los esfuerzos internos. Asimismo, es posible realizar de nuevo el diseño geotécnico y estructural, y obtener nuevos valores para el área de la base y el espesor de la losa, con nuevos esfuerzos internos. En base a los resultados de este paso, se calcula $k_i^{(2)}$, que sirve como entrada para la solución del problema de contacto en el segundo paso de la iteración. Si el asentamiento de los cimientos es positivo, la Ec. (2) determina el coeficiente de rigidez. Si los asentamientos son negativos, el coeficiente de rigidez es cero, lo que significa que los cimientos se levantan de la base. Para los pasos de iteración que siguen al primero, el coeficiente puede escribirse de forma general como en la Ec. (3).

$$\text{If } S_i^{(d)} \geq 0: k_i^{(d+1)} = \frac{q_{br_IIi}^{*(d)} - P_i^{(d)}}{\bar{S}_i^{(d)} \cdot \left[\left(\frac{q_{br_IIi}^{*(d)}}{R_i^{w(d)}} \right) - 1 \right]} \quad (3)$$



$$\text{If } S_i^{(d)} < 0 : k_i^{(d+1)} = 0 \\ (d = 1, 2, 3, \dots)$$

El proceso iterativo finaliza en el paso h, donde la diferencia entre los resultados del cálculo en este paso y el anterior h-1, es menor que algún valor dado, que caracteriza la precisión en los cálculos (normalmente el 5%). Los resultados del cálculo son $k_i^{(h)}$ y las fuerzas internas de la estructura para realizar el diseño geotécnico y estructural final.

4. Resultados y trabajo futuro

Los resultados mostrados estarán en función de dos aspectos fundamentales: la diferencia de incluir la ISE en los procedimientos de optimización y la importancia de optimizar los procesos de diseño.

4.1 Influencia de la ISE

Para chequear la influencia de la ISE se comparan los resultados finales del proceso de optimización sin incluirla e incluyéndola. La Fig. 3 representa una estructura de dos luces, dos intercolumnios y tres niveles, a la cual se le aplicó la metodología de optimización, utilizando dos tipos de suelos, uno predominantemente cohesivo (suelo 1) y el otro predominantemente friccional (Suelo 2).

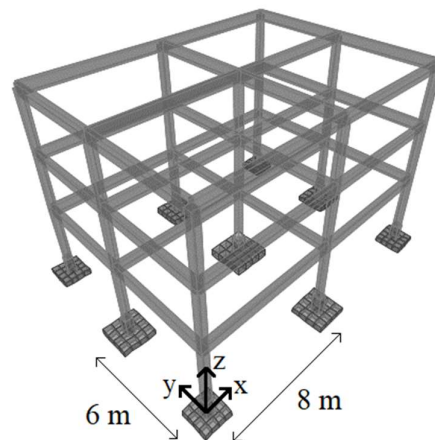


Figura 3. Caso de estudio de (Negrin et al, 2021a)

En este estudio (Negrin et al, 2021a) se obtuvo un diseño optimizado sin incluir la ISE con un valor de \$ 10362.60 (\$ 6556.32 la superestructura). Al optimizar el diseño incluyendo la ISE sobre el suelo 1, el resultado fue de \$ 10390.09 (\$ 6846.38) y sobre el



Convención CCI-UCLV 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

suelo 2 \$ 9970.34 (\$ 7313.48). Esto significa que la superestructura, al incluir ISE, es 4.42% y 11.52% más cara (suelo 1 y suelo 2 respectivamente) que cuando no se incluye, lo cual indica que, evidentemente, una superestructura con ISE incluida, es más solicitada que cuando no se tiene en cuenta este aspecto. Esto se debe a los asentamientos diferenciales que si existen en la realidad, y si se modela la estructura con apoyos idealizados (empotramiento o articulación), estos no aparecerán. Estos asentamientos diferenciales, aún en los intervalos permitidos, introducen fuerzas internas adicionales en la superestructura, haciéndola más solicitada. Al no incluir la ISE estamos diseñando elementos sometidos a más solicitaciones que las que supuestamente iban a recibir. Esto no causa una falla en la estructura, producto de mecanismos como las articulaciones plásticas, pero si causa deformaciones y agrietamiento excesivo, provocando el deterioro prematuro de la estructura.

Ahora bien, se pudiera pensar que para suelos predominantemente cohesivos este fenómeno es más agudo. Sin embargo, es todo lo contrario. Es cierto que en suelos de este tipo el asentamiento debieran ser mayores, pero los cimientos diseñados en estos casos son mucho más grandes que para suelos friccionales, debido a su inferior capacidad de carga. Esto hace que el diseño caiga, o en la zona lineal de asentamientos, o muy cerca de esta (recta 1 en la Fig. 2a), por lo que aunque los asentamientos pudieran ser grandes, todos los cimientos se asentarían con valores similares, y los asentamientos diferenciales serían pequeños, acercándose más a la condición de apoyos idealizados. Sin embargo, en suelos predominantemente friccionales, la zona de la curva 2 (Fig. 2a) es más grande que para suelos cohesivos, y los cimientos quedan mucho más pequeños que para suelos cohesivos, y el diseño cae en esta zona no-lineal, donde la diferencia de asentamiento se hace mucho más grande. Por eso, la inclusión de la ISE es mucho más significativa en suelos predominantemente friccionales.

El caso de estudio de (Negrin et al, 2021b) es aún más sensible a este aspecto (influencia de la ISE) (Fig. 4), debido a que es una planta asimétrica, lo cual incrementa la aparición de estos asentamientos diferenciales. Este es un proyecto real al cual se le aplicó la metodología de optimización. El suelo donde se proyectó la estructura es predominantemente friccional, lo que sumado a la asimetría en planta de la estructura, hacen que sea un caso de estudio muy sensible.

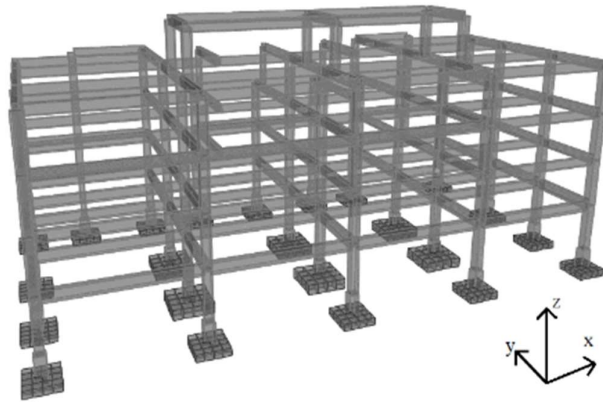


Figura 4. Proyecto Casa Cíndico (Negrin et al, 2021b)

En este caso los resultados fueron \$ 18859.03 (\$14968.50) sin ISE y \$ 21918.53 (\$16622.88), lo cual representa un 23% de diferencia. Esto significa que al diseñar la superestructura con el modelo sin ISE, lo estamos haciendo con un 23% menos de la cantidad materiales que llevaría en la realidad. Además se hizo el siguiente experimento: se diseñó la superestructura con ISE y sin ISE, manteniendo las mismas dimensiones de los elementos para chequear la diferencia solo en el refuerzo. Esto arrojó como resultados, diferencias en cuantías de refuerzo en vigas de hasta un 0.63% (la cuantía de refuerzo es la relación cantidad acero-cantidad de hormigón, expresada en porciento), y un valor normal de cuantía anda en el orden del 1% para refuerzo positivo y 1.5% para el negativo, o sea que el valor obtenido es realmente significativo. De forma práctica, este valor de 0.63% significa casi 2 barras de $\varnothing 19$, es decir, que hay al menos un elemento diseñado con dos barras $\varnothing 19$ de menos.

4.2 Importancia de optimizar el diseño de estructuras de HA

En este epígrafe se exponen las diferencias al optimizar el diseño de estructuras de HA sobre los diseños tradicionales basados en recomendaciones de diseño desactualizadas.

En el trabajo (Negrin et al, 2021b) se compararon los resultados del proceso de optimización a los obtenidos por los proyectistas. Sin incluir ISE, el proyecto propuesto por los proyectistas tenía un costo directo de construcción total de \$ 22193.04 (\$ 11765.90 las vigas, \$ 5019.50 las columnas y \$ los 5407.64 cimientos), el diseño optimizado quedó \$ 18859.03 (\$9251.31, \$ 5717.19 y \$ 5738.93). Esto representa un ahorro de 15%. Incluyendo la ISE, el diseño de los proyectistas quedó \$ 27919.42



(\$11808.17, \$ 10079.88 y \$ 6031.37) mientras que el optimizado fue de \$ 21918.53 (\$10803.51, \$ 5819.37 y \$ 5295.65), lo cual representa un ahorro del 21%.

Ahora bien, hasta aquí se ha utilizado el criterio económico, demostrando que la optimización del diseño es una alternativa extremadamente eficiente para obtener diseños mucho más racionales. En (Negrin et al, 2021c) se comienza el estudio de objetivos medioambientales como las emisiones de CO₂ y la EE. Aquí se demostró que estos tres objetivos (económico, CO₂ y EE) no son contradictorios, es decir, la disminución de uno de ellos está acompañada por una disminución de los otros (ver Fig. 5), por lo que la mera optimización económica también aporta beneficios medioambientales. Sin embargo, en la Fig. 5 se comprueba que la mejor opción sería utilizar las emisiones de CO₂ como objetivo, lo cual está relacionado con la relación de costos (económicos y medioambientales) entre el acero y el hormigón (Negrin et al, 2021c). Para una mayor información en este tema, consultar la bibliografía mostrada.

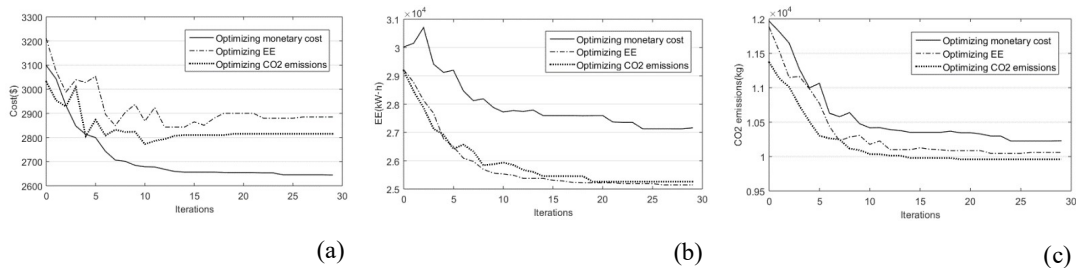


Figura 5. Curva de rendimiento promedio (valor de aptitud media en función del número de iteración) de cinco procesos de optimización, (a) es midiendo el costo económico utilizando los tres objetivos, (b) es midiendo EE y (c) midiendo CO₂ (Negrin et al, 2021c)

4.3 Líneas futuras de investigación

En función de los resultados obtenidos y sus limitaciones, se pretende incluir otros aspectos que posibiliten aumentar el alcance de los resultados.

- Inclusión dentro del problema de optimización, el denominado ángulo Beta (por algunos software de modelación, análisis y diseño estructural) como variable:

Este concepto consiste en girar la sección transversal un determinado ángulo. En este caso, se incluiría como variable de diseño, con solo dos valores, 0 y 1. Cuando esta variable toma valor 0, la sección no rota. Cuando toma valor 1, la sección rota 90°. Es conocido que mientras más elementos se agrupan como un solo conjunto de variables,



Convención CCI-UCLV 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

mas “ligero” será el problema de optimización, ya que se tendrán menos variables. Sin embargo, esto conduce a soluciones menos racionales (desde el punto de vista económico y medioambiental), pues más elementos quedarán sobredimensionados, es decir, uno (el más esforzado) decidirá el diseño de los demás, y mientras más elementos existan en ese grupo, más estarán sobredimensionados. En nuestras investigaciones es común que todas las columnas exteriores (por ejemplo), tomen las mismas dimensiones, en estructuras de pocos niveles claro está, y las de cada nivel tendrán el mismo diseño. Por ejemplo, en el caso de estudio de la Fig. 3, las 12 columnas exteriores (4 por nivel) tendrán la misma sección, pero las 4 columnas de cada nivel tendrán un diseño (configuración del acero de refuerzo) propio. Pudiera ser más racional asignar a cada grupo de 4 columnas de cada nivel 2 variables, complejizando a sobremanera el problema de optimización. Además, no es recomendable cambiar las secciones de las columnas que continúan en el nivel superior. Sin embargo, existen para estos casos simétricos, significantes diferencias de columnas exteriores en una misma planta: las columnas exteriores en la dirección de “x” y las que están en la dirección de “y”. En trabajos precedentes, se ha demostrado que la sección de las columnas es definida por el predominio de flexión producto de cargas gravitatorias, y los dos grupos de columnas anteriormente mencionados tienen predominios de flexión producto de estas cargas en direcciones perpendiculares, por lo que asignarles una misma sección no debe ser lo más racional, y establecer dos grupos de variables en vez de uno, complica el problema de optimización. Sin embargo, si se introduce una sola variable booleana (0 y 1), se puede hacer girar la sección de uno de los dos grupos de columnas, que tendrán la misma sección, pero pueden orientar su mayor rigidez en cualquiera de las dos direcciones. La Fig. 6 explica mejor este concepto. La sección “A” representa las columnas exteriores en la dirección de “x” y la B en la dirección de “y”. En el diseño de la Fig. 6a, la columna de sección B tiene más flexión producto de las cargas gravitatorias, por lo que seguramente es la que decide que la sección sea rectangular con el mayor lado en esa dirección, mientras que la columna A presenta un predominio de flexión en su dirección “débil” (o de menor rigidez), condicionando un diseño poco racional. Sin embargo, con solo una variable booleana se puede resolver esta situación, sin la necesidad de crear otro grupo (dos variables más), e incluso mejorando el criterio

constructivo, puesto que las dos secciones tendrán el mismo diseño, cosa que pudiera no suceder si se asignan variables diferente para cada grupo de columnas.

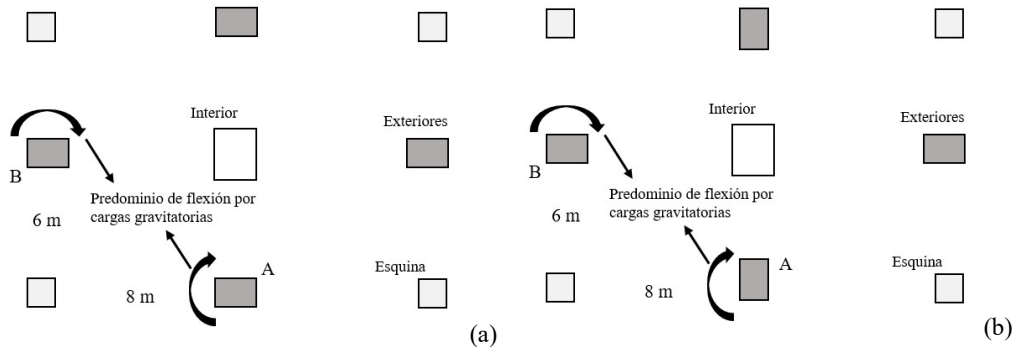


Figura 6. Representación en planta (no escala) de una posible solución de una planta del caso de estudio de la Fig. 3, (a) las cuatro columnas exteriores tienen la misma sección y (b) las cuatro columnas exteriores tienen la misma sección, pero la sección "A" fue girada 90° (la variable adicional es igual a 1)

- Inclusión de una variable que regule el criterio para diseñar los cimientos:

La práctica más usual es diseñar por área mínima, es decir, por capacidad de carga (siempre que el criterio de deformación cumpla). Esto es lo lógico ya que un cimiento más pequeño significa menos consumo de material. Sin embargo, se ha mencionado el efecto que producen los asentamientos diferenciales, y como producen fuerzas internas extras en la superestructura. Por tato, si se puede regular estos asentamientos diferenciales se pueden disminuir las fuerzas internas que estos provocan.

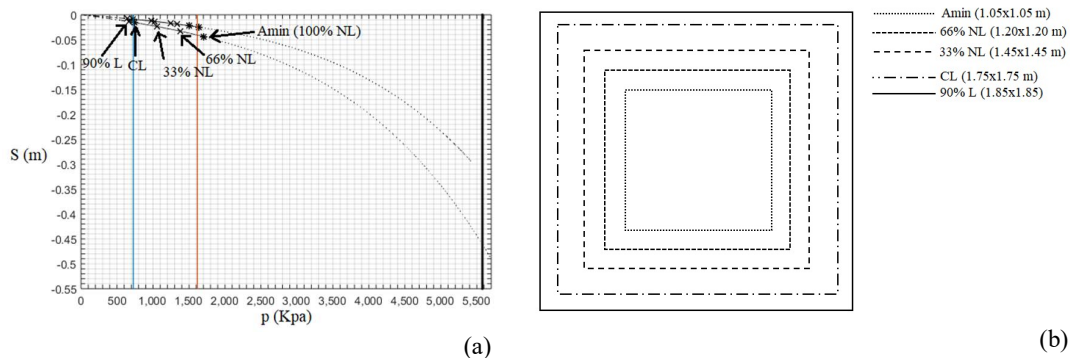


Figura 7. Ejemplo de cómo regular el diseño de un cimiento superficial aislado, (a) curvas p vs S de tres cimientos de una misma estructura (interior, exterior y esquina) con los cinco puntos representados, las curvas superiores pertenecen a los cimientos exteriores y esquina y casi que se superponen por lo que parecen una sola, la de abajo pertenece al cimiento interior representado en (b), dónde se muestran las dimensiones al diseñar por los cinco puntos representados en (a)



La Fig. 7 pertenece a un estudio que está en proceso, donde se trata de regular los asentamientos diferenciales para comprobar su influencia sobre la redistribución de fuerzas interiores de la superestructura. Como resultado preliminar se puede plantear que para este mismo caso mostrado, regulando el diseño de los cimientos (todos juntos) se disminuye la distorsión angular de una viga (es la diferencia de asentamiento de un extremo y del otro en función de la longitud del elemento) en un 30% con un aumento del 60% del área del cimiento, para un suelo predominantemente friccional. Está claro que esto es un solo caso de los muchos que pueden existir, y estos números no dicen nada concreto, solo que si se puede regular los asentamientos diferenciales, la distorsión angular y con esto, las fuerzas interiores que aparecen en la superestructura producto de este fenómeno. Además, en el estudio mencionado se regula el diseño de todos los cimientos a la vez. Regular el cimiento por grupo seguramente conducirá a resultados mucho más racionales, aunque a costa de complejizar el problema de optimización.

Esta estrategia, al igual que la anterior, se introducirá como variable en el proceso de cimentación. Cada grupo de cimientos (generalmente son 3: interiores, exteriores y esquina) generaría un variable adicional que regularía por cuál de los puntos se haría el diseño geotécnico (que deriva en una área de base determinada, y su correspondiente asentamiento). Para el caso de suelos predominantemente friccionales, como el de la Fig. 7, que tienen curvas con una mayor comportamiento no lineal, se pudieran establecer esos cinco puntos como posibles valores de la variable, aunque el estudio que se está llevando a cabo ha arrojado como resultados preliminares que los diseños en la zona de comportamiento lineal aumentan significativamente le área de la base, mientras que los asentamientos no sufren grandes cambios. Por tanto, el número de puntos se pudiera reducir.

5. Conclusiones

En este trabajo se resumen algunas de las estrategias utilizadas por nuestro grupo de investigación para aumentar el índice de sostenibilidad de las estructuras de HA. Además del criterio económico, se presentan otros de carácter medioambiental, de durabilidad y constructivos. Todos estos pueden derivar en la obtención de diseños racionales, respetuosos con el medio ambiente, duraderos y fáciles de construir no solo hasta la etapa de construcción, sino durante todo el ciclo de vida de la estructura.



Además se introducen alternativas para tener en cuenta factores usualmente ignorados como la interacción suelo-estructura.

Los resultados demuestran, que este aspecto es muy significativo para estructuras aporticadas. Cuando se incluye, las diferencias de fuerzas internas en la superestructura no son despreciables. Midiendo esta diferencia por el costo de la superestructura, par estructuras de mediana complejidad, estas son de alrededor de un 5% para suelos predominantemente cohesivos y 10% para suelos predominantemente friccionales. Para el segundo caso de estudio analizado, estas aumentaron hasta un 23%, siendo esta una estructura de elevada complejidad, con asimetría en planta y proyectada sobre un suelo predominantemente friccional.

Por otra parte, al aplicar la herramienta de optimización, se obtienen diseños de alrededor de un 10\$ más económicos para estructuras de mediana complejidad. En el caso de estudio de elevada complejidad, se ahorró hasta un 21% comparado con diseños tradicionales. Además, se ha probado que la mera optimización económica brinda beneficios medioambientales también.

Finalmente se proponen alternativas para aumentar aún más estos índices de sostenibilidad, basándonos en la propia optimización estructural.

6. Referencias bibliográficas

1. Afshari, H., Hare, W. y Tesfamariam, S. (2019), "Constrained multi-objective optimization algorithms: Review and comparison with application in reinforced concrete structures", Applied Soft Computing Journal, Volume 83. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105631>
2. Bremner TW. (2001) Environmental aspects of concrete: problems and solutions. In: Proceedings of first all-Russian conference on concrete and reinforced concrete, Moscow, Russia.
3. Camp Ch. Y Huq F. (2013) CO2 and cost optimisation of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. Engineering Structures 48 363–372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.004>
4. Davidovits, J. (1993) Geopolymer cements to minimize carbon-dioxide greenhouse warming. Ceramic Transactions 37 pp. 165–182.



Convención CCI-UCLV 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

5. De Medeiros, G. y Kripka M. (2014) Optimisation of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. *Engineering Structures* 59 185–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.045>
6. De Medeiros, G. F. y Kripka, M. (2016), “Modified harmony search and its application to cost minimization of RC columns”, *Advances in Computational Design*, 2(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.1.001>
7. García-Segura, T., Yepes, V., Frangopol, D.M y Yang, D. (2017) Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges, *Engineering Structures* 145 pp. 381–391. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.013>
8. Gartner, E. (2004) Industrially interesting approaches to “low-CO2 cements. *Cement and Concrete Research* 34 (9) pp. 1489–1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
9. Guerra, A. and Kioussis, P. D. (2006), “Design optimization of reinforced concrete structures”, *Computers and Concrete*, 3(5), pp. 313-334.
10. Intercement. Annual Report 2010: how the cement market works. https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ungc-production/attachments/11045/original/Intercement_RA2010_INGbx.pdf?
11. IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, Paris, France, 2005.
12. Kaveh, A. (2017) Cost and CO2 Emission Optimisation of Reinforced Concrete Frames Using Enhanced Colliding Bodies Optimisation Algorithm. In book: *Applications of Metaheuristic Optimisation Algorithms in Civil Engineering*. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-48012-1_17
13. Klepikov, S. N. (1969) Solución general para vigas y placas sobre bases que se deforman elásticamente con rigidez variable, *Investigaciones sobre bases, cimentaciones y mecánica de suelos*. Budivielnik, Kiev, pp. 37-47.
14. Klepikov, S. N., Tregub, A. S. and Matveev, I. V. (1987), *Calculo de Edificios y Obras sobre suelos colapsables*, Budivielnik, Kiev.
15. Malasri, S., Halijan, D. A. and Keough, M. L. (1994), Concrete Beam Design Optimization with Genetic Algorithms, *Journal of the Arkansas Academy of Science*, Volume 48, pp. 111-115. Available at: <https://scholarworks.uark.edu/jaas/vol48/iss1/23>



16. Negrin I., Chagoyén E. y Negrin A. (2019a) Meta-heuristic optimization of structural sets of reinforced concrete, *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 35 No 2, pp. 181-192. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000200181>
17. Negrin I., Chagoyén E. y Negrin A. (2019b) Optimization of reinforced concrete plane frames using a hybridization of Genetic Algorithms and the Nelder-Mead algorithm (in Spanish), *Rev. Ob. y Proy.* Vol. 36, pp. 74-86. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132019000200074>
18. Negrin I., Negrin, L.I. y Chagoyén E. (2020) Ajuste de parámetros de algoritmos genéticos: propuesta de método compuesto, *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, Vol. 14, No. 3, ISSN: 2227-1899 | RNPS: 2301
19. Negrin I., Chagoyén E. y Negrin A. (2021a) Parameter tuning in the process of optimization of reinforced concrete structures, *DYNA*, 88(216), pp. 87-95. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.87169>
20. Negrin, I., D. Roose, E. Chagoyén y G. Lombaert (2021b) Biogeography-Based Optimization of RC structures including static soil-structure interaction, *Structural Engineering and Mechanics*, (preprint). Available at: <http://arxiv.org/abs/2103.05129>
21. Negrin I. y Chagoyén E (2021c) Economic and environmental design optimization of RC structures: a comparative study. *Structures*. (En revisión)
22. Negrin, I., D. Roose y E. Chagoyén (2021d) Parameter tuning strategies for metaheuristic methods applied to discrete optimization of structural design, *Investigación Operacional*. (En revisión)
23. ONN (NC) (2014), "Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales", Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
24. WBCSD-IEA, Cement Technology Roadmap 2009 Carbon Emissions Reductions up to 2050, World Business Council for Sustainable Development—International Energy Agency, Geneva, Switzerland, 2009.
25. Payá, I., Yépes, V., González-Vidosa, F., Hospitaler, (2008) A. Multiobjective Optimisation of Concrete Frames by Simulated Annealing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23 596–610. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00561.x>
26. Paya I., Yepes, V., Hospitaler, A., González-Vidosa, F. (2009) CO₂-optimisation of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures* 31 1501_1508. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>



Convención CCI-UCLV 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
La optimización como herramienta para mejorar los índices de sostenibilidad de las estructuras de HA

27. Sartori, I., Hestnes, A.G. (2007) Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: a review article. *Energy and Buildings* 39 (3) 249–257.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
28. Serpik, I., Mironenko, I. y Averchenkov, V. (2016), Algorithm for Evolutionary Optimization of Reinforced Concrete Frames Subject to Nonlinear Material Deformation, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016, *Procedia Engineering*, Issue 150, pp. 1311-1316.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.304>
29. Thormark, C. (2002) A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation, and recycling potential. *Building and Environment* 37 (4) 429–435. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
30. Yeo, D. y Gabbai, R. (2011) Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimisation. *Energy and Buildings*, 43 pp. 2028–2033.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.014>
31. Yeo, D. and Potra, F. A. (2015), Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through CO2 Emission Optimization, *Journal of Structural Engineering*, 141(3).
32. Yohanis, Y.G. y Norton, B. (2002) Life cycle operational and embodied energy for a generic single-story office building in the UK. *Energy* 27 (1) 77–92.
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00061-5)