

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN EMPLEANDO ALGORITMO SIMULATED ANNEALING MODIFICADO

Millan Paramo, Carlos A.^{1,2,*}; Arrieta Baldovino, Jair¹

¹-. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

²- Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia

*e-mail: carlos.millan@unisucre.edu.co

Recibido (28/11/16), aceptado (25/01/18)

Resumen: En este trabajo, se desarrolla un procedimiento para el diseño de muros de contención de hormigón armado de bajo peso, empleando el algoritmo simulated annealing modificado (ASAM). El objetivo de la optimización es minimizar el peso total por unidad de longitud de la estructura de retención basado en el procedimiento de la ACI 318-05. El algoritmo es validado utilizando dos problemas de referencia con variables continuas para la geometría del muro y variables discretas en el acero de refuerzo para la optimización del diseño estructural. Finalmente, los resultados numéricos demuestran la eficiencia del algoritmo presentado para este tipo de problemas.

Palabras: Optimización, muros de contención, algoritmo simulated annealing modificado.

OPTIMIZATION DESIGN OF RETAINING WALLS USING MODIFIED SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

Abstract: In this paper, a procedure is developed for designing low-weight cantilever reinforced concrete retaining walls, using modified simulated annealing algorithm (MSAA). The objective of the optimization is to minimize the total weight per unit length of the retaining structure based on the ACI 318-05 procedure. The algorithm is validated using two benchmark case studies with continuous variables for wall geometry and discrete variables for steel reinforcement to optimize the structural design. Finally, the numerical results demonstrate the efficiency of the presented algorithm for this class of problems.

Key words: Optimization; retaining walls; modified simulated annealing algorithm.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los tipos de estructuras de retención geotécnica más comunes y usados es el muro de contención en voladizo de concreto reforzado. En el análisis y diseño de estructuras de contención, la interacción entre el suelo y las estructuras plantea muchos desafíos para el diseñador; la estructura debe soportar de forma segura y fiable el suelo de relleno, proporcionar estabilidad frente a la posibilidad de vuelco y deslizamiento, limitar los esfuerzos tanto en el suelo y la estructura, y proporcionar factores de seguridad aceptables para todos los modos de falla [1]. Además de estos objetivos de diseño, hay varios requisitos que el muro de concreto reforzado debe satisfacer; como el de disponer de suficiente capacidad de fuerza cortante y momento en la pared, pie, talón y dentellón del muro; la capacidad de carga de la fundación no puede permitir esfuerzo de tensión; y la configuración del acero de refuerzo debe cumplir con todos los requisitos del código de construcción [1].

Optimizar el diseño de muros de contención es considerado un problema difícil de resolver, debido a las restricciones que presenta, formando zonas factibles de solución que son altamente no lineales, no convexas e implícitas con respecto a las variables de diseño. Por lo tanto los enfoques determinísticos (programación matemática) resultan difícil y requieren mucho tiempo para ser aplicados a estos problemas de optimización, asimismo, un buen punto de partida es vital para que estos métodos puedan ejecutarse con éxito. Bajo tales circunstancias, los algoritmos metaheurísticos basados en imitar procesos naturales pueden servir como alternativas apropiadas, debido a la capacidad de encontrar mínimos locales en espacios de búsquedas altamente modales y multidimensionales.

Métodos para el desarrollo de diseños de bajo costo de estructuras de contención han sido objeto de investigación durante muchos años. Sin embargo, la aplicación de métodos metaheurísticos para el diseño de estas estructuras es relativamente nueva: Ceranic [2] y Yepes [3] aplicaron recocido simulado (Simulated Annealing - SA); Kaveh [4] aplicó búsqueda armónica (Harmony Search - HS); Gandomi [5] empleando diferentes técnicas de enjambres inteligentes (Particle Swarm Optimization - PSO, Firefly Algorithm - FA). Coello [6], Rajeev [7], Camp [8], Lee [9], Sahab [10], y Kwak [11] aplicaron varias formas de algoritmos genéticos (AG) para la resolución de este problema.

Uno de los requisitos más importantes para llevar a cabo una búsqueda con éxito utilizando un algoritmo metaheurísticos es mantener un equilibrio adecuado entre la diversificación y la intensificación. La diversificación

es la exploración del espacio de búsqueda, mientras que intensificación es la explotación de las mejores soluciones encontradas [12]. Una de las dificultades que surgen como resultado de la falta de un equilibrio es la fuerte tendencia del algoritmo para converger prematuramente. Esto significa que el algoritmo no explora el espacio de búsqueda completamente; se queda atrapado en una pequeña región del espacio de búsqueda, y en consecuencia converge a una solución que está sustancialmente lejos del óptimo global.

En este estudio, se propone emplear el Algoritmo Simulated Annealing Modificado (ASAM) [13], recientemente desarrollado, para abordar el problema de optimización (minimización de peso) del diseño de muros de contención, debido a su notable desempeño en comparación con técnicas como HS, AG, PSO, entre otras. Para mayores detalles se recomienda consultar [13]. ASAM se basa en el proceso de enfriamiento de metales empleado en el Simulated Annealing (SA) clásico pero posee tres características fundamentales (exploración preliminar, paso de búsqueda y probabilidad de aceptación) que lo diferencian de este. En su primera parte este trabajo presenta la descripción del problema de optimización estructural. Seguidamente se describe brevemente el algoritmo ASAM, sus fundamentos y los parámetros que lo controlan. Para demostrar la eficacia y validez del algoritmo, dos problemas de referencias relacionados con el diseño de muros de contención son analizados.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Figura 1 muestra un muro de contención modelado con 12 variables de diseño: ancho de la base (X1), ancho del pie (X2), ancho de la parte inferior de la pared (X3), ancho de la parte superior de la pared (X4), espesor de la base (X5), la distancia desde el pie y la parte delantera del dentellón (X6), ancho del dentellón (X7), espesor del dentellón (X8), acero de refuerzo vertical de la pared (R1), acero de refuerzo horizontal del pie y talón (R2 y R3, respectivamente) y el acero de refuerzo vertical del dentellón (R4).

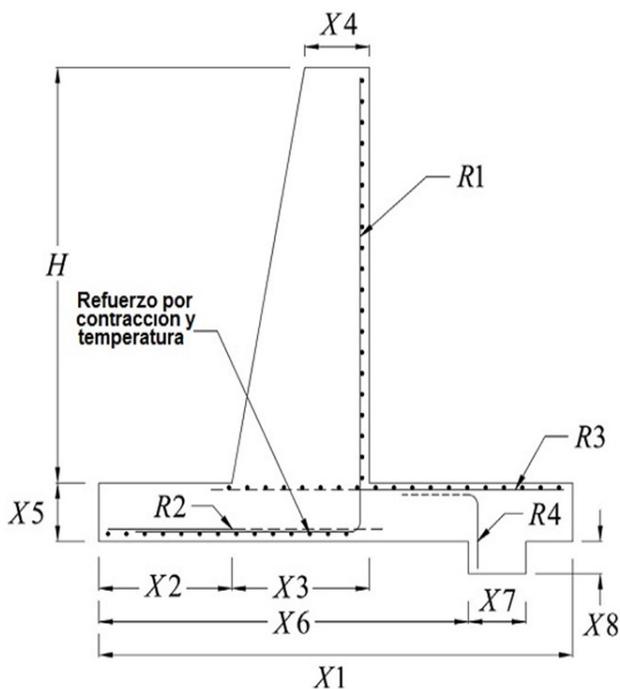


Figura 1. Variables de diseño muro de contención

Las variables X1 a X8 representan la geometría del muro, y las variables R1 a R4 representan el acero de refuerzo. Para X1 a X8, se usan variables continuas, mientras que para R1 a R4, se considera un conjunto de valores discretos, como se muestra en la Tabla I. Se utilizaron un total de 223 combinaciones de refuerzo para representar entre 3 y 28 barras de 10-30 mm de diámetro uniformemente espaciadas [1]. El diseño del muro de contención se divide en dos fases: diseño geotécnico y diseño estructural. En la fase del diseño geotécnico, el muro debe ser chequeado para volcamiento, deslizamiento y capacidad de carga. En la fase del diseño estructural, el muro debe satisfacer los esfuerzos cortantes y de momentos en la pared, pie, talón y dentellón. Una breve revisión del procedimiento de diseño geotécnico y estructural se presenta en esta sección.

Tabla I. Propiedades del acero de refuerzo para las variables R1 a R4.

Número de combinación	Refuerzo		Total As (cm ²)
	Cantidad	Tamaño barra (mm)	
1	3	10	2,356
2	4	10	3,141
3	3	12	3,392
4	5	10	3,926
5	4	12	4,523
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
221	16	30	113,097
222	17	30	120,165
223	18	30	127,234

Todas las fuerzas actuantes en el muro con mostradas en la Figura 2, donde W_c es el peso combinado de todas las secciones del muro; W_s es el peso del relleno que actúa sobre el talón del muro, q es la sobrecarga distribuida (Q es la resultante de la sobrecarga); P_A es la resultante de la presión activa del suelo; P_k y P_T son las fuerzas resultante de la presión pasiva del suelo en la parte delantera del pie y dentellón, respectivamente; P_B es la fuerza resultante de la presión del suelo sobre la base. Los coeficientes de presión de tierra activa y pasiva se evalúan usando la teoría de Rankine [14], usando las ecuaciones (1) y (2), respectivamente:

$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}} \quad (1)$$

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

donde β es el ángulo de inclinación y ϕ es el ángulo de fricción del suelo del relleno.

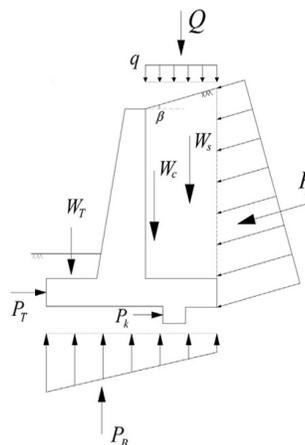


Figura 2. Fuerzas actuantes sobre el muro de contención

El diseño geotécnico y estructural del muro de contención fue basado en Das [14] y Camp [1] de la siguiente manera:

Requisitos de estabilidad geotécnica

El factor de seguridad de volcamiento del muro es calculado de la siguiente manera:

$$FS_O = \frac{\sum M_R}{\sum M_O} \quad (3)$$

donde $\sum M_R$ es la suma de los momentos que tienden a volcar y $\sum M_O$ es la suma de los momentos que tienden a evitar el vuelco.

El factor de seguridad de deslizamiento es definido por

$$FS_S = \frac{\sum F_R}{\sum F_D} \quad (4)$$

donde $\sum F_R$ es la suma de fuerzas de resistencia horizontal contra el deslizamiento y $\sum F_D$ la suma de las fuerzas horizontales a favor del deslizamiento, definidas por la ecuación (5) y (6), respectivamente.

$$\sum F_R = \left(\sum W_{wall} \right) \tan\left(\frac{2\phi_{base}}{3}\right) + \frac{2BC_{base}}{3} + P_p \quad (5)$$

$$\sum F_D = P_a \cos\beta \quad (6)$$

donde $\sum W_{wall}$ es el peso total del muro, ϕ_{base} es el ángulo de fricción del suelo de fundación, B es el ancho total de la base, C_{base} es la cohesión del suelo de fundación, P_p la fuerza pasiva y P_a la fuerza activa.

El factor de seguridad de la capacidad de carga es expresado por:

$$FS_B = \frac{q_u}{q_{max}} \quad (7)$$

donde q_u es la capacidad de carga última del suelo de fundación y q_{max} es la máxima presión de carga bajo la fundación, determinada usando la ecuación (8):

$$q_{max}^{min} = \frac{\sum V}{B} \left(1 \mp \frac{6e}{B} \right) \quad (8)$$

donde $\sum V$ es la suma de fuerzas verticales (resultante del peso del muro, suelo sobre la base, y sobrecarga); B es el ancho de la base; y e la excentricidad de la resultante del sistema de fuerzas, expresada de la siguiente manera:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_R - \sum M_O}{\sum V} \quad (3)$$

Requisitos de resistencia estructural

El momento y la capacidad a cortante de cada sección del muro de contención deben ser mayores o iguales a las de diseño. Basado en la ACI 318-05 [15], la resistencia a la flexión se puede calcular usando la ecuación (10):

$$M_n = \phi f_y A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (10)$$

donde ϕ es el coeficiente de resistencia nominal (igual 0.9), A_s es el área de acero de refuerzo, f_y es el esfuerzo de fluencia del acero, d es la distancia desde la superficie de compresión al centroide del refuerzo de tensión, y a es la profundidad del bloque de tensiones.

La resistencia a cortante es calculada siguiendo la ecuación (11):

$$V_n = \phi 0.17 \sqrt{f_c} b d \quad (11)$$

donde ϕ es el coeficiente de resistencia nominal (igual a 0.75), f_c es la resistencia a compresión del concreto, y b es el espesor de la sección.

III. OPTIMIZACIÓN

Generalmente, los problemas de optimización minimizan una función objetivo $f(x)$, sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0 & i &= 1, 2, \dots, p \\ h_j(x) &= 0 & j &= 1, 2, \dots, m \\ L_k &\leq X_k \leq U_k & k &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (12)$$

donde $g(x)$ son restricciones de desigualdad, $h(x)$ son restricciones de igualdad, L y U son los límites de las variables. Esta sección describe la función objetivo y restricciones usadas en este estudio.

Función objetivo

Con el fin de llegar a un diseño óptimo utilizando técnicas metaheurísticas, es necesario para definir una función objetivo $f(x)$. En este trabajo se utilizó la propuesta por Saribaş [16] que está en función del peso de los materiales:

$$f_{peso} = W_{st} + 100 V_c \gamma_c \quad (13)$$

donde γ_c es el peso unitario del concreto; y se utiliza un factor de 100 para la consistencia de unidades [16].

Restricciones

El diseño de muros de contención seguros y estables basados en ACI 318-05 [15], requiere satisfacer ciertas condiciones relacionadas con la estabilidad, capacidad y geometría del muro [1].

• Restricciones de estabilidad

Las ecuaciones (14)-(16) definen la estabilidad del muro de contención:

$$FS_O \geq FS_{O\text{diseño}} \tag{14}$$

$$FS_S \geq FS_{S\text{diseño}} \tag{15}$$

$$FS_B \geq FS_{B\text{diseño}} \tag{16}$$

donde $FS_{O\text{diseño}}$, $FS_{S\text{diseño}}$, $FS_{B\text{diseño}}$ son factores de seguridad prescritos para volcamiento, deslizamiento y capacidad de carga.

• Restricciones de capacidad

Cada sección del muro de contención debe tener capacidad para resistir las cargas efectivas. Dos criterios, propuestos en ACI 318-05 [15] son tenidos en cuenta:

$$M_n \geq M_d \tag{17}$$

$$V_n \geq V_d \tag{18}$$

donde M_d y V_d son el momento y cortante solicitados, respectivamente, y M_n y V_n son el momento y cortante nominal, respectivamente. Además, cumplir con las limitaciones de refuerzo:

$$\rho_{min} = 0.25 \frac{\sqrt{f_c}}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \tag{19}$$

$$\rho_{max} = 0.85 \beta_1 \frac{f_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \tag{20}$$

donde ρ_{min} y ρ_{max} son las cuantías mínima y máxima, respectivamente; f_c la resistencia a compresión del concreto; f_y el esfuerzo de fluencia del acero y β_1 es calculado basado en la ACI 318-05 como sigue:

$$\begin{cases} f_c \leq 30MPa & \beta_1 = 0.85 \\ f_c > 30MPa & \beta_1 = 0.85 - \frac{0.05}{7}(f_c - 30) \geq 0.65 \end{cases} \tag{21}$$

• Restricciones de geometría

Las restricciones de geometría consisten en restricciones de límites y de desigualdad definidas para producir diseños prácticos. Para este estudio, un conjunto de valores continuos se consideraron para las variables X1 a X8 (como se indica en la Figura 1), y un conjunto de valores discretos se consideraron para las variables R1 a R4 (como se indica en la Tabla I). Para prevenir dimensiones del muro no factibles, las siguientes restricciones de desigualdad, propuestas en Camp [1], fueron impuestas:

$$X_1 \geq X_2 + X_3 \tag{22}$$

$$X_1 \geq X_6 + X_7 \tag{23}$$

IV. ALGORITMO SIMULATED ANNEALING MODIFICADO (ASAM)

Antes de sintetizar las características de ASAM, vale la pena describir brevemente el funcionamiento del Simulated Annealing básico. SA comienza con un cierto estado S. A través de un proceso único crea un estado vecino S' al estado inicial. Si la energía o la evaluación del estado S' son menores que el estado S cambia el estado S por S'. Si la evaluación de S' es mayor que la de S puede estar empeorando, por lo que elige S' en vez de S con una cierta probabilidad que depende de las diferencias en las evaluaciones y la temperatura del sistema T. La probabilidad de aceptar un peor estado se calcula por la siguiente ecuación:

$$P(\Delta f, T) = e^{(\Delta f/T)} \tag{24}$$

donde P es la probabilidad de aceptar el nuevo estado; Δf la diferencia de las evaluaciones de la función para cada estado; T temperatura del sistema y e número de Euler.

Inicialmente, con valores grandes para T, frecuentemente se aceptan soluciones con un mayor valor de función objetivo; a medida que el valor de T disminuye, tal tipo de soluciones raramente se aceptan, y cuando T se acerca a cero, solo se aceptan aquellas soluciones que mejoran la anterior. Varios estudios teóricos demuestran que sí T decrece con la suficiente lentitud, el proceso converge a la solución óptima. La función para reducción de temperatura más utilizada es: $T_{(k+1)} = T_k \alpha^k$, donde $T_{(k+1)}$ es el nuevo valor ajustado de T, T_k corresponde al previo valor de T y α es una constante que está comprendida en el intervalo [0.8-0.99].

SA comienza con una solución inicial escogida aleatoriamente en el espacio de búsqueda y la compara con otra que también se selecciona estocásticamente en el espacio de búsqueda, lo que afecta al algoritmo cuando se tienen funciones altamente dimensionales y modales generando mayores tiempos de búsqueda y soluciones subóptimas. Además, la probabilidad de aceptación de una solución peor se encuentra en un intervalo de entre 0 y 1, lo cual causa que a temperaturas iniciales el algoritmo acepte un gran número de soluciones de peor calidad (aumentando el riesgo de quedar atrapado en un óptimo local).

En este contexto el algoritmo ASAM, tiene 3 características fundamentales que lo hacen diferente respecto al Simulated Annealing básico. Dichas características son las siguientes:

Exploración preliminar

En esta etapa el algoritmo realiza una exploración en todo el espacio de búsqueda que viene dado por la siguiente matriz:

$$X_{PxN} = I_{PxN} X_{min} + rand_{PxN} (X_{max} - X_{min}) \quad (25)$$

donde P es el número de puntos (estados) que se desean en el espacio de búsqueda; N el número de dimensiones del problema; I_{PxN} es una matriz identidad de tamaño PxN; X_{min} el límite inferior del problema; X_{max} el límite superior del problema y $rand_{PxN}$ una matriz PxN de números aleatorios (aleatoriedad pura) entre 0 y 1.

Para comenzar el proceso de optimización con ASAM se evalúan todos los puntos generados con la ecuación (25) mediante la función objetivo del problema y se escoge el que tenga menor valor (en el caso de estar buscando el valor mínimo de la función) como punto inicial de la búsqueda.

Paso de búsqueda

A partir del punto inicial determinado en la etapa anterior, se genera un paso de búsqueda para determinar el estado vecino. Este paso depende de un radio de acción que se reduce gradualmente a medida que desciende la temperatura del sistema. Es decir, cuando el algoritmo está en determinada temperatura, con radio de acción definido por la ecuación (26), la transición del punto inicial al nuevo punto (paso de búsqueda) se realiza mediante la adición de números aleatorios que están comprendidos entre cero y el valor del radio. Esto permite que el algoritmo realice una exploración global a temperaturas altas y una exploración local a temperaturas bajas, dando un equilibrio entre la exploración y la explotación del algoritmo.

$$R_{i+1} = R_i \cdot \alpha \quad (26)$$

donde, R_i es el radio inicial ciclo y α el coeficiente de reducción del radio.

Probabilidad de aceptación

En esta propuesta la probabilidad de aceptación de una solución (estado) peor viene dada por:

$$P = \frac{1}{1 + e^{(\Delta f/T)}} \quad (27)$$

donde P es la probabilidad de aceptar el nuevo estado; Δf la diferencia de las evaluaciones de la función para cada estado; T temperatura del sistema y e número de Euler.

Esta probabilidad se encuentra en un intervalo entre 0 y $\frac{1}{2}$, lo que permite al algoritmo tener un rango menor de aceptación de peores soluciones.

En resumen, las 3 modificaciones propuestas en ASAM

tienen la finalidad de mejorar la exploración inicial, permitir un balance entre exploración inicial y final y controlar la convergencia en la etapa final de búsqueda.

V. PROBLEMAS NUMERICOS

Para validar el desempeño de ASAM, dos ejemplos numéricos expuestos en Saribaş [16] fueron analizados. Teniendo en cuenta que el algoritmo estudiado en este trabajo es de naturaleza estocástica, a continuación se describen los criterios para evaluar su desempeño. La desviación estándar de las funciones analíticas se utilizó para medir la precisión y la estabilidad del método. Se dice que un método heurístico de optimización que es estable y preciso si su desviación estándar es baja. El algoritmo se puede catalogar como robusto si cuando se aplica en diferentes problemas presenta precisión y exactitud. En este trabajo, cada corrida del algoritmo se realizó 100 veces [5] y el mejor valor de la función, el peor valor de la función, la media y la desviación estándar de los valores son reportados. La implementación del algoritmo fue realizada en Matlab®, bajo el sistema operativo Windows 7 y el equipo utilizado fue un Intel Core i7-2.4 GHz, 8GB (RAM).

Problema 1

Para este ejemplo, el dentellón no está incluido en el diseño del muro de contención. Los valores de los parámetros utilizados para el Problema 1 están indicados en la Tabla II. Los límites de las variables de diseño se encuentran en la Tabla III.

La Tabla IV lista los resultados de los valores de las variables de diseño, el peor, mejor, media y desviación estándar (DE) de los diseños encontrados con ASAM comparados con Camp [1], quien utilizó el algoritmo Big Bang – Big Crouch (BB-BC). La convergencia del algoritmo se presenta en la Figura 3.

Tabla II. Parámetros para los Problemas 1 y 2 [1]

Parámetro	Símbolo	Valor		Unidad
		Problema 1	Problema 2	
Altura del muro	H	3,0	4,5	m
Esfuerzo de fluencia del acero	f_y	400	400	MPa
Esfuerzo a la compresión del concreto	f_c	21	21	MPa
Recubrimiento	C_c	7	7	cm
Cuántía de refuerzo por contracción y temperatura	ρ_{st}	0,002	0,002	-
Sobrecarga	q	20	30	kPa
Ángulo de inclinación del relleno	β	10	0	°
Ángulo de fricción interna del suelo de relleno	ϕ	36	28	°
Ángulo de fricción interna del suelo de fundación	ϕ'	0	34	°
Peso específico del suelo de relleno	γ_s	17,5	17,5	kN/m ³
Peso específico del suelo de fundación	γ'_s	18,5	18,5	kN/m ³
Peso específico del concreto	γ_c	23,5	23,5	kN/m ³
Cohesión del suelo de fundación	c	125	0	kPa
Altura de suelo en frente del muro	D	0,5	0,3	m
Factor seguridad volcamiento	$FS_{O\text{diseño}}$	1,5	1,5	-
Factor seguridad deslizamiento	$FS_{S\text{diseño}}$	1,5	1,5	-
Factor seguridad capacidad de carga	$FS_{B\text{diseño}}$	3,0	1,5	-

Tabla III. Límites de las variables de diseño para Problema 1 y 2 [1]

Variable de diseño	Unidad	Problema 1		Problema 2	
		Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
X1	m	1,3090	2,3333	1,96	5,5
X2	m	0,4363	0,7777	0,65	1,16
X3	m	0,2000	0,3333	0,25	0,5
X4	m	0,2000	0,3333	0,25	0,5
X5	m	0,2722	0,3333	0,4	0,5
X6	m	-	-	1,96	5,5
X7	m	-	-	0,2	0,5
X8	m	-	-	0,2	0,5
R1	-	1	223	1	223
R2	-	1	223	1	223
R3	-	1	223	1	223
R4	-	-	-	1	223

Tabla IV. Comparación de resultados para Problema 1

Variable	Camp BB-BC [1]	Este trabajo
X1 (m)	1,745	1,783
X2 (m)	0,656	0,661
X3 (m)	0,200	0,200
X4 (m)	0,200	0,200
X5 (m)	0,272	0,272
R1	27-10 mm	8-18 mm
R2	10-10 mm	14-10 mm
R3	10-10 mm	10*10 mm
Mejor (kg/m)	2608,3	2608,5
Peor (kg/m)	-	2608,9
Media (kg/m)	-	2608,7
DE (kg/m)	-	0,128

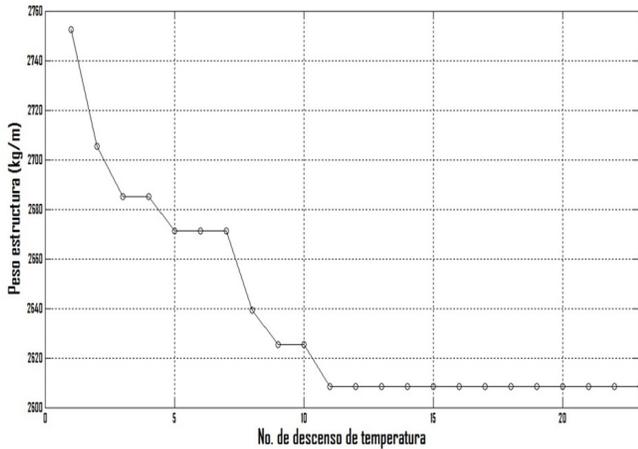


Figura 3. Convergencia Problema I

Problema 2

Para el segundo problema, dos diferentes casos de diseño son considerados: uno sin dentellón (Caso 1), y uno con dentellón (Caso 2). Se utilizaron los parámetros propuestos por Saribaş [16], como se muestran en la Tabla II. La Tabla III muestra los límites de las variables de diseño. En la serie de las 100 ejecuciones, los valores de las variables de diseño, el mejor, el peor, la media y la DS para el Caso 1 y Caso 2 son presentados en la Tabla V. En la Figura 4 y 5 se encuentran las gráficas de convergencias para cada caso.

Tabla V. Comparación de resultados para Problema 2

Variable	Camp BB-BC [1]		Este trabajo	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
X1 (m)	4,310	3,760	4,281	3,760
X2 (m)	0,650	0,680	0,650	0,650
X3 (m)	0,410	0,410	0,409	0,409
X4 (m)	0,250	0,250	0,250	0,250
X5 (m)	0,400	0,400	0,400	0,400
X6 (m)	-	3,220	-	3,281
X7 (m)	-	0,200	-	0,200
X8 (m)	-	0,490	-	0,473
R1	22-14 mm	22-14 mm	24-14 mm	22-14 mm
R2	15-10 mm	18-10 mm	16-10 mm	20-10 mm
R3	22-14 mm	20-14 mm	24-14 mm	20-14 mm
R4	-	6-10 mm	-	6-10 mm
Mejor (kg/m)	7821,554	7525,407	7822,4	7524,9
Peor (kg/m)	-	-	7824,2	7526,9
Media (kg/m)	-	-	7823,3	7525,8
DE (kg/m)	-	-	0,511	0,570

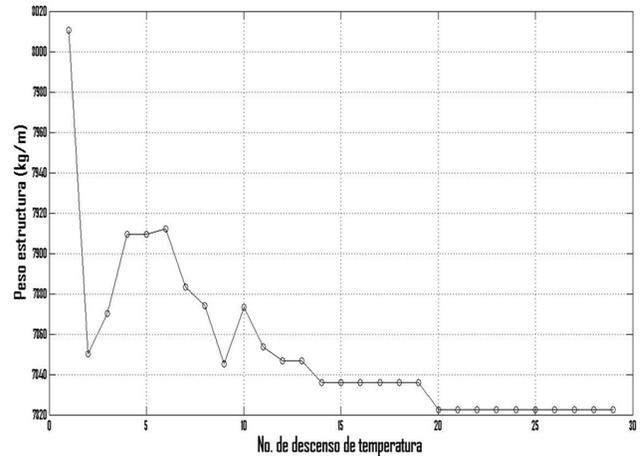


Figura 4. Convergencia Problema 2 – Caso 1

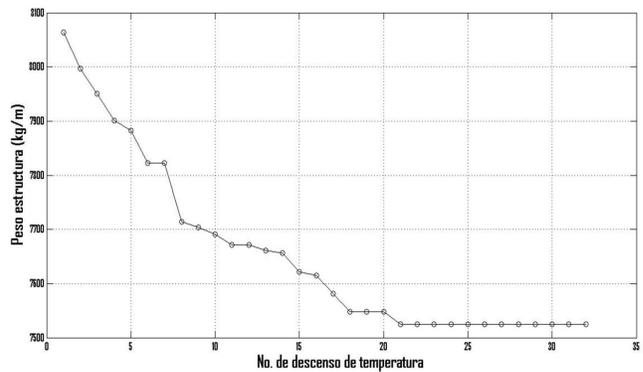


Figura 5. Convergencia Problema 2 – Caso 2

Se puede considerar que ASAM es un algoritmo de optimización robusto debido a que encontró valores iguales o mejores que los reportados por Camp. Por otro lado, se puede afirmar que ASAM muestra una gran capacidad para escapar de óptimos locales debido a que estos problemas contienen espacios de búsquedas altamente no lineales y no convexos. Igualmente, mostró potencial de búsqueda al manejar diferentes problemas, con distintos parámetros y límites de las variables de diseño. En el Problema 1, el mejor diseño encontrado por ASAM (2608,5 kg/m) es igual cuando se compara con el algoritmo BB-BC.

En el Problema 2, para el Caso 1, el mejor diseño (7826,4 kg/m) encontrado por ASAM es aproximadamente 1,0 kg/m más pesado que el de Camp [1]. En el Caso 2, los resultados muestran que ASAM generó una estructura de 7524,9 kg/m, siendo 0,5 kg/m más liviana. Desde el punto de vista estadístico, en los dos problemas, los valores de peso, media y DE nos indica la exactitud, precisión, estabilidad y robustez de la técnica para la resolución de este tipo de problemas. Es importante

mencionar que Camp [1] no reporta valores de peor, media y DS de los resultados.

VI. CONCLUSIONES

Se ha conseguido evaluar el desempeño del Algoritmo Simulated Annealing Modificado (ASAM) en el problema de optimización del diseño de muros de contención. Los valores de las variables de diseño y pesos obtenidos por ASAM, fueron comparados con los resultados reportados por Camp [1], mostrando que son coherentes y satisfactorios (ver Tabla IV y V), dando así validez al trabajo aquí realizado.

En cuanto a la técnica empleada, se puede observar que ASAM tiene precisión, robustez, y versatilidad para enfrentar diversos tipos de problemas, con diferentes números de variables, esto se ve reflejado en los pesos, pesos promedios, y desviación estándar conseguidos.

VII. REFERENCIAS

- [1]C. V. Camp and A. Alkin, "Design of Retaining Walls Using Big Bang–Big Crunch Optimization," *J. Struct. Eng.*, vol. 138, no. 3, pp. 438-448, 2012.
- [2]B. Ceranic, C. Fryer, and R. W. Baines, "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures," *Comput. Struct*, vol. 79, no. 17, pp. 1569-1581, 2001.
- [3]V. Yepes, J. Alcala, C. Perea, and F. González-Vidosa, "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing," *Eng. Struct*, vol. 30, no. 3, pp. 821-830, 2008.
- [4]A. Kaveh and A. Abadi, "Harmony search based algorithm for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-8, 2010.
- [5]A. Gandomi, A. Kashani, D. Roke, and M. Mousavi, "Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques," *Engineering Structures*, vol. 103, pp. 72-84, 2015.
- [6]C. Coello, A. D. Christiansen, and F. Santos, "A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams," *Eng. Comput.*, vol. 13, no. 4, pp. 185-196, 1997.
- [7]S. Rajeev and C. S. Krishnamoorthy, "Genetic algorithms-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames," *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 63-74, 1998.
- [8]C. V. Camp, S. Pezeshk, and H. Hansson, "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm," *J. Struct. Eng.*, vol. 129, no. 1, pp. 105-115, 2003.
- [9]C. L. Lee and J. Ahn, "Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm," *J. Struct. Eng.*,

vol. 129, no. 6, p. 762–774, 2003.

[10]M. G. Sahab, A. F. Ashour, and V. V. Toropov, "Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 3, p. 313–322, 2004.

[11]H.G. Kwak and J. Kim, "Optimum design of reinforced concrete plane frames based on predetermined section database," *Comput. Aided Des.*, vol. 40, no. 3, pp. 396-408, 2008.

[12]E.G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley and Sons, 2009.

[13]C. Millan, O. Begambre, and E. Millan, "Propuesta y validación de un algoritmo Simulated annealing modificado para la solución de problemas de optimización," *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.*, vol. 30, no. 4, p. 264–270, 2014.

[14]B. M. Das, *Principles of geotechnical engineering*. Boston: PWS Publishing, 1994.

[15]A.C. Institute, "Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-05)," 2005.

[16]A.Saribaş and F. Erbatur, "Optimization and sensitivity of retaining structures," *J. Geotech. Eng.*, vol. 122, no. 8, pp. 649-656, 1996.