INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING

SIMSG ISSMGE

This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Diseño optimo de cimentaciones superficiales rectangulares

Dr. Ernesto L. Chagoyén Méndez & Dr. Alexis Negrín Hernández
Departamento de Ing. Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba,

Ing. Nelson Padrón, Ing. Ma. de los Ángeles Cabrera Cárdenas, Ing. Luis Alberto López Rojas, Ing. Lyena Rodriguez Quintero
Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas U. A. A.# 4, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

RESUMEN
Se presentan las consideraciones iniciales necesarias para formular un problema de diseño óptimo de cimentaciones superficiales rectangulares en suelos cuyo esquema de resistencia a cortante corresponde a suelos friccionales, cohesivos y cohesivo-friccionales, tomando como función objetivo el costo directo mínimo de la solución. La formulación matemática del problema en régimen de optimización incluye la definición de la función objetivo, la caracterización de las principales variables que intervienen en el problema (tanto variables externas como internas), así como la definición de las restricciones y parámetros asignados, etapas que deben desarrollarse durante el proceso de optimización, lo cual deja el problema listo para su solución. Se resuelve el problema y se presentan un análisis de los resultados indicando las variables que influyen y presentando mediante tablas y gráficas los intervalos para los cuales se obtiene la solución en función de la profundidad de cimentación, la rectangularidad del cimiento y la excentricidad de las cargas como variables fundamentales que definen el optimo para los tres tipos de suelos antes mencionados.

ABSTRACT
Necessary initial considerations are presented to formulate an optimal design problem for rectangular shallow foundations in frictional, cohesive and cohesive-frictional soils, in which the objective is minimize the direct construction cost of the solution, based on geotechnical and structural (both) limit states design method. Mathematical formulation of the optimal problem includes: definition of objective function, characterization of main (external and internal) variables that govern the problem as well as definition of restrictions and assigned parameters, which prepare problem for its solution. After the solution is obtained, an analysis of the results is presented, indicating the influence of variables and the ranges for which the solution is obtained by means of charts, depending on the foundation depth, the foundation rectangularity and load eccentricity as principal variables that define the optimal for the three types of soil mentioned. Factors deciding the problem and its solution are discussed.

1 INTRODUCCION

La optimización, de forma general, persigue la premisa de indicar de forma cuantitativa y cualitativa con una base verdaderamente objetiva y científica cuál es la mejor solución para un problema determinado. El principio metodológico de esta radica en modelar matemáticamente los principales rasgos y características que definen las cualidades de los problemas ingenieriles, así como las restricciones de comportamiento, tecnológicas, ecológicas, etc. a que éstos están sometidos, para luego, mediante un algoritmo o método matemático encontrar cuál es la respuesta o solución óptima.

Existen muchos trabajos de optimización publicados en distintos campos de acción del Ingeniero Civil en Cuba, por ejemplo los relacionados con la optimización de cimientos, losas y vigas de hormigón armado de Penado (1982, a y b).

Utilizando la teoría de Krakovsky y realizando aportes en la determinación de la dirección del antigradiente cuando no se cumple alguna de las restricciones y al movimiento según el antigradiente Negrín (1988) crea un programa en N-88 BASIC, logrando resultados muy positivos en el proceso de optimización de columnas.

Otro trabajo relacionado con la temática es el de Quevedo y Lima (1983) sobre Rectangularidad económica en cimientos superficiales, que sin tener una formulación en régimen de optimización, resolvió el problema para el nivel de los conocimientos geotécnicos y estructurales vigentes en aquel momento.

En los años 90 se siguen desarrollando investigaciones, sobre todo de diseño óptimo de estructuras, destacándose las realizadas por Castellanos (2000) y Negrín (2005). Sixto Ruiz Alejo (2001) demuestra técnica y científicamente la sustitución de la forma geométrica tradicional de las cimentaciones y aplica una nueva concepción que resulta confiable, durable y más económica, aunque no puede hablarse como tal de optimización en dichos trabajos.

Gómez y Morales (2000) confeccionan un esquema para el Diseño Óptimo Asistido por Computadoras, sobre un modelo matemático para resolver la optimización de vigas de hormigón armado y cimentaciones superficiales, y un software de diseño y optimización de estas vigas (Galileo), cuyo núcleo lo constituye un Algoritmo Genético.

No hay sin embargo ningún trabajo sobre el tema con el nivel de conocimientos actuales sobre diseño geotécnico y estructural, ni la formulación del diseño óptimo de cimentaciones sobre esa base. Finalmente no existen

tampoco recomendaciones elaboradas para el diseño geotécnico y estructural de cimentaciones superficiales tendientes a minimizar el costo de este elemento durante la etapa de diseño.

2 DESARROLLO

2.1 Criterios de Optimización

El objetivo es obtener un diseño de cimentaciones superficiales de costo mínimo, a partir de la combinación de las variables de diseño que, saliendo de un estudio de las cargas actuantes para determinadas estructuras típicas por su función arquitectónica, considerando los escenarios que imponen las diferentes condiciones ingeniero geológicas que pudieran presentarse y cumpliendo con todas las restricciones impuestas por las diferentes normativas, que determinen un diseño geotécnico y estructural de costo mínimo.

2.2 Formulación del modelo para el diseño optimo de estructuras de hormigón armado.

El modelo se refiere a cimentaciones superficiales rectangulares, que constituyen la tipología de cimentación más usada cuando se trata de superestructuras en forma de esqueleto, y que trasmiten las cargas a la subestructura en forma de fuerzas que se modelan como concentradas, ya sea como resultado de una análisis plano como el que se muestra (ver Fig. 1) o 3D, el cual incorporaría además fuerzas horizontales y momentos flectores en dos direcciones.

El diseño de la cimentación debe satisfacer adecuadamente varios requisitos derivados de su definición como elementos estructural que sirve de transición entre la superestructura y la base, debiendo garantizar la trasmisión de las cargas de forma tal que no se produzca la rotura de la base, ni que esta se deforme tanto que dañe elementos de la superestructura soportados, ni que se produzcan fenómenos indeseables como la socavación, subpresiones y otros que dañen la base o la propia cimentación, siendo finalmente el mismo un elemento autoportante desde el punto de vista estructural.

De aquí se determinan como variables de diseño:

1. La profundidad de cimentación, df.
2. Las dimensiones en planta de la base de la cimentación: B y L.

Son estas precisamente unas de las principales variables objeto de optimización, la cual pudiera en este caso formularse de varias formas, o desde varios puntos de vista con respecto a estas variables, por ejemplo:

a. ¿Cuál es la relación entre los lados B y L (rectangularidad) de la cimentación que produce un costo mínimo en la solución?

b. ¿Cuál es la profundidad de cimentación que garantiza el costo mínimo de la solución?

Estas dos interrogantes pueden resolverse con la formulación que se plantea en este trabajo.

El resto de las variables que definen el costo de la solución son (Ver Fig. 2): calidad del hormigón y el acero a emplear (f´c y fy), espesor del plato, h, cuantías y posición del refuerzo del plato y del pedestal o vaso, dimensiones del pedestal o vaso, bc y lc.

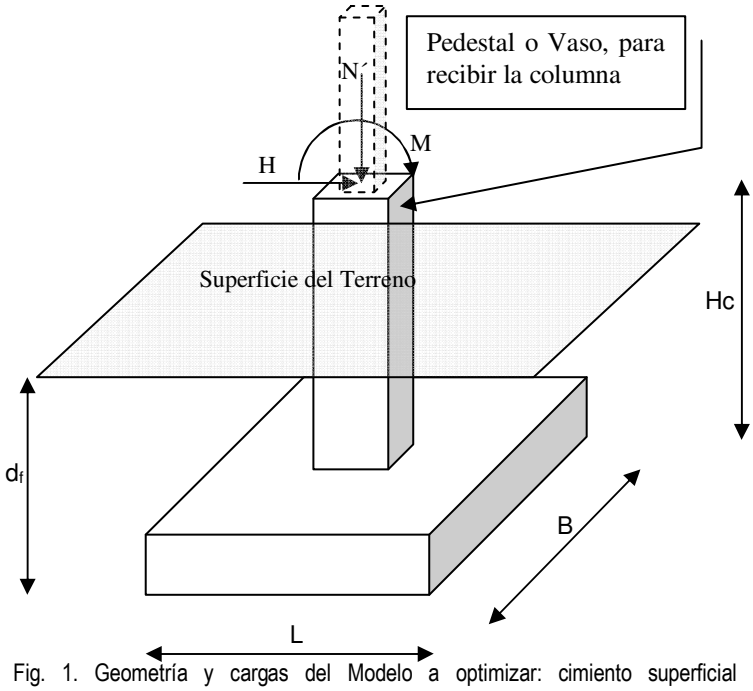


Fig. 1. Geometría y cargas del Modelo a optimizar: cimiento superficial rectangular, bajo análisis plano.

2.3 Determinación del costo de la solución en Cuba.

El presupuesto de los servicios de construcción es el resultado de la valoración de todas las acciones que se prevén realizar para llevar a cabo los trabajos de construcción y montaje de las partes que componen una obra, objetos de obra, agrupaciones productivas, etc., y se regulan por el Sistema Presupuestario de la Construcción en Cuba, PRECONS II (MICONS (2008))

Los costos en la construcción están estructurados en costos directos y costos indirectos, estos últimos generalmente se toman como una parte de los costos directos en función de la productividad de determinadas empresas. Los costos o gastos directos se componen de GD Materiales, GD mano de obra, y GD Uso de equipos. Estos tres gastos conforman los Costos Base a los cuales se suman Otros Gastos Directos de Obra(OGDO) y Gastos Generales Directos de Obra(GGDO), que incluyen visitas de especialistas a la obra, pruebas de calidad, actividades de replanteo y preparación técnica de la obra, gastos administrativos, elaboración de ofertas respectivamente. Luego se puede presentar la siguiente ecuación para los costos o gastos directos:

$$GD = \text{Costos base} + OGDO + GGDO \qquad (1)$$

2.4 Función Objetivo.

La función objetivo es la expresión analítica del criterio de optimización seleccionado. En este trabajo el análisis está

dirigido a minimizar el costo total de una cimentación superficial aislada.

La función objetivo para el caso de cimentaciones superficiales podría estar definida por:

$$C_{total} = C_{exc} + C_{enc} + C_{acero} + C_{horm} + C_{reh} \rightarrow Mínimo \qquad (2)$$

donde: Cexc: costo de la excavación. Se expresa en pesos ($), Cenc: costo de encofrado y desencofre. Se expresa en pesos ($), Cacero: costo de elaboración y colocación de acero. Se expresan en pesos ($), Chorm: costo de hormigonado. Se expresa en pesos ($), Creh: costo de rehincho. Se expresa en pesos ($), El costo de estas actividades está representado de manera general por una expresión que puede adoptar la siguiente forma:

$$C_{act} = V_{act} \times CU_{act} \qquad (3)$$

Donde: C_{act} : Costo de la actividad. Se expresa en pesos ($), V_{act} : Volumen de trabajo de la actividad. (U.M), CU_{act} : Costo unitario de la actividad. Se expresa en pesos por la U. M. considerada ($/U.M.).

2.4.1 Consideraciones generales para el cálculo de los costos de la solución.

Durante la determinación del costo de la solución, se realiza una serie de consideraciones, con el propósito de unificar los cálculos y simplificar o regularizar un tanto las diversas situaciones que pueden presentarse. Entre estas podemos enumerar:

- En las actividades relacionadas con la excavación se considerara que al menos un 10% de la misma se realizara de forma manual, siguiendo el concepto de que la terminación de las mismas debe hacerse manual para alterar lo menos posible el terreno (perfilado).
- En las actividades que abarcan el encofrado y desencofrado, para el costo de la madera se considera un uso de la misma de hasta 5 veces.
- El costo del acero se divide en dos partidas: Elaboración y Colocación.
- Para ambos procesos los resultados de costos devolverán un valor en pesos por cada tonelada ($/t), este resultado se ajusta dividiendo el peso de las barras de cada diámetro en Kgf por 1000 y multiplicando por el precio unitario de la tonelada de acero para barras del diámetro correspondiente.
- En la actividad de hormigonado se considerarán tres resistencias del hormigón f'c = 20, 25 y 30MPa, y se tomará en cuenta el uso de aditivo para el caso del costo de elaboración (el vertido es para cualquier calidad). Además se incluye el volumen de hormigón del vaso, porque para el caso de naves industriales este se considera hormigonado "in situ".
- El volumen de rehincho se determina restando el volumen de hormigonado del de la excavación. se considerara el rehincho compactado mecanizadamente.
- La influencia de los costos indirectos no se analizará porque complicarían mucho el problema de obtener los costos mínimos, además en la práctica estos se fijan como una porción de los costos directos, según PRECONS II.

2.5 Parámetros Variables

Las principales variables a tener en cuenta en nuestro problema son las siguientes:

- **Cargas:** (valores de solicitaciones a nivel de cimentación, M, H, N´ derivadas de la acción de cargas temporales ó vivas, cargas permanentes ó muertas, carga ecológica de viento, cargas tecnológicas, etc., y sus combinaciones probables para cada estado límite o condición de diseño). Un resumen de las características de las estructuras de naves industriales y las cargas adoptadas para la investigación se muestran a continuación:

[redacted]

- **Materiales:** calidad del acero y hormigón fy y f´c; para el acero se tomó fy = 300 MPa y para el hormigón se tomaron valores de f´c = 20 MPa, 25 MPa y 30 MPa, que son los más frecuentes en estos tipos de elementos. Los parámetros físico-mecánicos de suelos, como son: peso especifico de los suelos γ, se tomó para el suelo por encima del nivel de cimentación, es decir los suelos de relleno, γ = 17.5 kN/m3 y para el suelo de la base se tomó γ = 17.5 kN/m3. Para los suelos arenosos, el ángulo de fricción interna φ y el módulo de deformación E, que se tomó con sus valores más frecuentes de acuerdo a las correlaciones existentes (Quevedo (2002)), en el caso de los suelos cohesivos, el parámetro de resistencia a cortante tomado fue la cohesión c, en kPa y además igualmente se tomó el módulo de deformación:
- Propiedades de los suelos friccionales:

φ en º	E, kPa	φ en º	E, kPa	φ en º	E, kPa
28	15 000	32	23 000	36	38 000
30	18 000	34	30 000	38	44 000
-	-	-	-	40	45 000

- Propiedades de los suelos cohesivos:

C, kPa	E, MPa	C, kPa	E, MPa	C, kPa	E, MPa
50	8 000	70	16 000	90	24 000
60	12 000	80	20 000	100	26 000
-	-	-	-	110	30 000

- **Variables Geométricas,** entre las que están: Profundidad de cimentación (df): Se tomó en el intervalo entre 1.5 m a 3 m, con incrementos de 0.5 m, como los valores más frecuentes; Dimensiones o lados de la cimentación, L y B; Rectangularidad de la base, tomada como B/L; Peralto de la cimentación, total: h y efectivo, d; Cuantías de refuerzo del plato en ambas direcciones; Dimensiones y refuerzo del pedestal o vaso.
- Algunas de las variables no ejercen influencia significativa durante el proceso de optimización. Entre ellas señalamos a la calidad del acero y del hormigón(Quevedo, Lima, 1983). De esta manera el problema queda reducido esencialmente a las cargas, los

valores de excentricidad, las propiedades del suelo y la profundidad de cimentación. Los valores de momento y carga axial no ofrecen resultados que se diferencian significativamente, sino que es la excentricidad inicial e_0 la que mayor influencia ejerce en el proceso (Quevedo y Lima (1983)).

2.6 Parámetros Asignados

Aquellas cualidades cuyos valores son fijados por el investigador antes del cálculo y que por lo tanto permanecen constantes durante todo el proceso, se les denominará como parámetros asignados. En nuestro caso, para su mejor comprensión hemos agrupado los parátros asignados de acuerdo a su relación con el proceso de diseño en Geotécnicos, Estructurales y Constructivos.

a. Parámetros Geotécnicos.

1. Se considerará la base de cimentación homogénea, sin presencia de nivel freático, ni por encima ni por debajo de la cimentación (ver Fig. 2). Por encima del nivel de cimentación se supondrá que el suelo está constituido por un relleno de γ_1 = 17.5 kN/m3 de peso especifico. Esto simplifica notablemente la dependencia de la capacidad de carga con la profundidad de cimentación. Por debajo del nivel de cimentación el peso específico se adoptará como γ_2 = 17.5 kN/m3.
2. La profundidad de cimentación df, se estudiará tomando en cuenta valores entre de 1.5 y 3 m.
3. Se tomaron las condiciones de trabajo de la base como normales, de acuerdo la propuesta de norma cubana por el diseño geotécnico, (Quevedo (2002)).
4. La importancia del fallo se catalogará como grave lo que significa que aquí se encuentran obras en las que su fallo tiene la probabilidad de ocasionar pocas pérdidas de vidas humanas, económicas y ecológicas, tales como edificios de industrias, almacenes obras de fábrica, etc., (Quevedo (2002)).
5. Los coeficientes γ_{c1} y γ_{c2} que valoran las condiciones de trabajo del suelo y tipos de estructuras respectivamente, se tomarán de la siguiente forma:

Para arenas se supondrá γ_{c1}=1.25

Para arcillas se supondrá γ_{c1} = 1.2; que corresponde a $0.25 \leq IL \leq 0.5$

Los valores de γ_{c2} serán:

Para naves industriales con relación $L/H \geq 4$; γ_{c2}=1

Para el resto de las edificaciones L/H= 2.75; γ_{c2}=1.05

6. En el diseño geotécnico por el primer estado límite se adoptarán las siguientes combinaciones de carga:

Edificios sociales	Se añaden para edificios industriales:
1.4 CP	1.2CP+1.6CT+1.4Ctecn
1.2CP+CT+1.3 CE	0.9CP + CT + 1.4Ctecn
1.2CP+1.6CT+0.8CE	
1.2CP + 1.6CT	
0.9CP +1.3 CE	
Siendo: CP las cargas permanentes o muertas, CE las cargas ecológicas de vientos extremos, CT las cargas temporales debido a la utilización de edificio, Ctecn, la carga tecnológica en naves industriales.	

7. En el diseño geotécnico por el segundo estado límite se adoptará la combinación de CP con sus valores normativos, pues se considera en edificios industriales que la CT es de muy corta duración y no provoca asentamientos en las bases de las cimentaciones.
8. En el diseño geotécnico por el segundo estado límite se comprobarán los asentamientos absolutos solamente y se considerará comportamiento en la etapa lineal o no lineal del suelo, en función de las presiones ejercidas sobre la base.
9. Las características físico-mecánicas del suelo se tomarán de las tablas por lo que el coeficiente de fiabilidad se toma k = 1.1 en la determinación de R' (esfuerzo limite de linealidad del suelo).

b. Parámetros Estructurales.

1. El diseño del peralto del plato se realizará a partir del mínimo necesario por condiciones de punzonamiento, cortante y refuerzo por flexión negativa.
2. Se estudiará la solución de cimiento de hormigón armado y no de hormigón masivo.
3. La frontera entre comportamiento rígido y flexible se adopta de acuerdo a lo que establece la propuesta de norma para el diseño estructural de cimentaciones superficiales (Chagoyen y Broche, 2002), que plantea que el cimiento se considera flexible si h ≤ Vuelo /2, donde h es el espesor efectivo del plato de la cimentación y Vuelo es el voladizo de la losa que conforma el plato, por fuera del pedestal o columna.
4. Las combinaciones de carga serán las mismas que para el diseño geotécnico por el primer estado límite que se muestran en el punto 6 de los parámetros asignados de tipo geotécnico.

c. Parámetros Constructivos.

1. Los recubrimientos serán los establecidos por la propuesta de norma, es decir 7 cm.
2. No se utilizará hormigón de sellaje en el fondo de la excavación.
3. El refuerzo estará constituido siempre por barras corrugadas.
4. La excavación se realizará de forma aislada para cada cimiento, analizando la inclinación que puede soportar el suelo y la estabilidad de talud de los mismos. En arcillas se permiten taludes verticales, Sower (1978). En suelos friccionales, la inclinación de los taludes de la excavación variará en función del ángulo de fricción interna (φ) del estrato donde se apoya la cimentación (ver Fig. 3).
5. La distancia entre el pie del talud y el plato del cimiento se tomará 0.75 m, para facilitar el desplaza-miento de los obreros durante los trabajos.

2.7 Ecuaciones de Estado y Restricciones:

Las restricciones son todos aquellos valores que tienen que satisfacer, como condiciones, los parámetros variables para considerar que un diseño es correcto, se definen matemáticamente como limitaciones específicas inferiores, superiores o de igualdad impuestas sobre las variables de diseño o sobre los parámetros asignados en forma de ecuaciones e inecuaciones, que se expresan en la forma:

$$G(X, P, \ldots) \leq 0 \qquad (5)$$

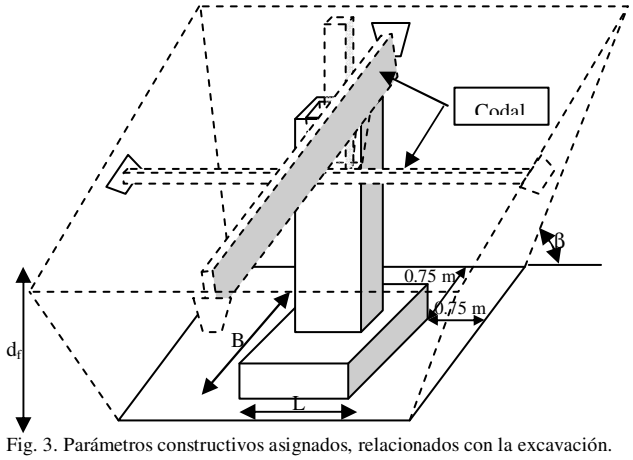


Fig. 3. Parámetros constructivos asignados, relacionados con la excavación.

Como ejemplos de ecuaciones de estado más importantes para el diseño de cimentaciones superficiales se pueden citar:

Para el diseño geotécnico por 1er. E.L:

$$F.S._{vuelco} = \frac{Mestabiliz\,antes}{Mdesestabilizantes} \geq 1.5 \quad (5) \qquad N^* \leq Qbt^* \quad (7)$$

$$H^* \leq 0.75 \cdot b' \cdot l' c^* \text{ ò } H^* \leq 0.75 \cdot N'^* \cdot \tan(\phi^*) \cdot b' \cdot l' \quad (6)$$

Las cuales expresan por ese orden la condición de adecuado factor de seguridad al vuelco, al deslizamiento y de resistencia que deben quedar satisfechas durante esta etapa de diseño.

Para el diseño geotécnico por el 2do. E.L:

$$S_{Cál} \leq S_{Lim} \quad (8) \qquad p \leq R' \quad (10)$$

$$F.S._{vuelco} \geq 3 \quad (9)$$

Estas a su vez expresan la condición de deformaciones menores que las admisibles y de vuelco para las cargas del 2do. Estado Límite, así como la condición límite para conocer si los asentamientos están dentro de la etapa lineal de comportamiento del suelo o no, lo cual determina la herramienta para su cálculo.

Para el diseño estructural:

$$\tau_{pz} \leq \phi \cdot R_{pz} \quad (11) \qquad M_{ul} \leq \phi \cdot M_{crl} \; y \quad (14),$$

$$V_{ul} \leq \phi \cdot V_{cl} \; y \quad (12), \qquad M_{ub} \leq \phi \cdot M_{crb} \quad (15)$$

$$V_{ub} \leq \phi \cdot V_{cb} \quad (13)$$

Las cuales expresan respectivamente las condiciones de resistencia al punzonamiento, cortante en ambas direcciones y flexión positiva en ambos sentidos del plato.

2.8 Método de Solución

Existen diversas formas de clasificación de los métodos de solución de los problemas de optimización, pero el método específico a utilizar en esta investigación, es el de exploración de variables, que es un tipo de método de búsqueda y por tanto entra en la esfera de las simulaciones que es donde se encuentran la mayoría de los métodos de búsqueda (búsqueda total, aleatoria, etc.)

2.9 Uso de la Computación para el Diseño óptimo de Estructuras

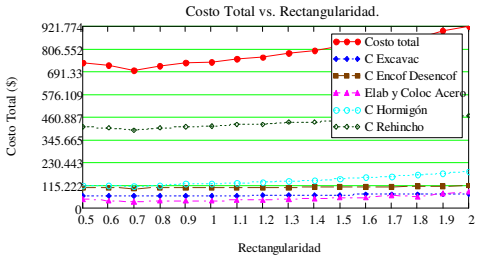
Para solucionar el problema del diseño óptimo de una cimentación superficial aislada se utilizó el Mathcad 14, donde se programaron todas las funciones que definen el diseño geotécnico y estructural de las cimentaciones, así como los cálculos de volúmenes de trabajo y los costos de todas las actividades que participan en la definición de la función objetivo, para obtener el costo mínimo del cimiento y además la rectangularidad para la cual se alcanza este mínimo.

2.10 Análisis de los Resultados

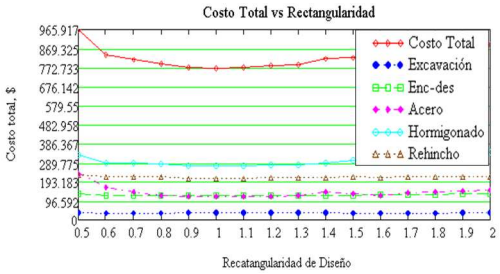
Al analizar los resultados obtenidos, existen varios aspectos significativos que queremos resaltar. Entre ellos están:

a) Composición o estructura de los costos obtenidos para una cimentación aislada sobre suelos friccionales. Para desarrollar este aspecto se tomaron como muestra dos columnas, la columna 7(interna) y la columna 6(externa). Para φ = 340 los resultados muestran que en este tipo de suelo predominan los costos de excavación-rehincho (Fig. 5 a,b), con más del 55%. En suelos cohesivos, por el contrario, predomina el costo del hormigonado (34%), y en segundo lugar la dupla excavación-rehincho con 32%.

b) Diferencias Costo Máximo – Costo Mínimo: Este aspecto resalta la pertinencia de la optimación en el diseño. En ambos casos de suelos estudiados, las diferencias pueden alcanzar hasta más del 30%, lo cual demuestra la importancia de la optimación en estos casos (Tabla 1).



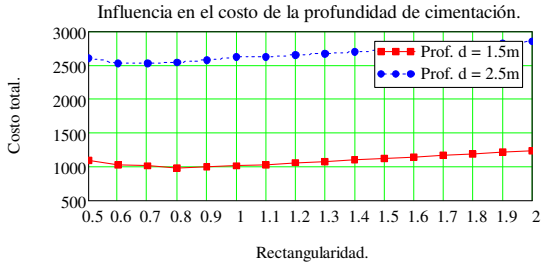
Columna 7 φ = 34⁰, d = 1.5m, e_0 = 0 m.



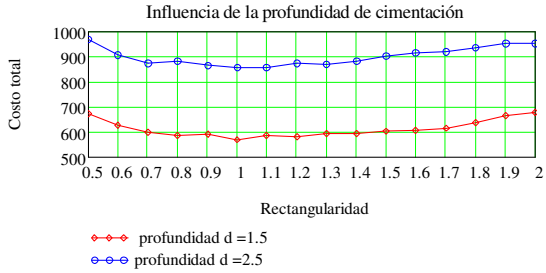
Col 1, C=50kPa, f'c=25 MPa,d= 1.5m,$e_0 \neq 0$

Fig 5 Estructura de los costos.

c) Influencia de la variable profundidad de cimentación: Del análisis de los resultados obtenidos concluimos que la profundidad óptima resulta ser la mínima posible, por las condiciones de los costos en Cuba (Fig. 6).



Columna 1 φ = 280.



C= 80 kPa, f'c = 25MPa

Fig. 6 Influencia de la prof. de cimentación.

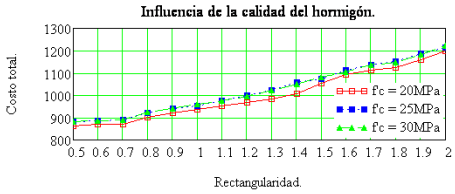
Tabla 1. Diferencia Costo Máximo-Costo Mínimo.

φ(°)/C(kPa)	Col.	Cmín.	Cmáx.	Dif. (%)
28	7	1018,06	1209,27	18.78
	6	1471,25	1868,99	27.03
36	7	639,37	857,13	34.05
	6	1107,3	1481,71	33.81
50	6	1014,61	1338,94	31.96
	1	768,67	965,92	25.66
110	6	858,98	1137,96	32,47
	1	482,53	642,18	33,08

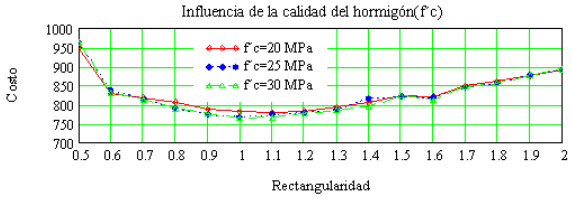
d) Influencia de la calidad del hormigón: Tanto para suelo cohesivo como para suelo friccional se demuestra que esta variable no introduce cambios en el valor de la rectangularidad óptima (Fig. 7).

e) Relación entre parámetros mecánicos (c, φ), la excentricidad inicial (e_0) y la rectangularidad óptima:
Las superficies de rectangularidad óptimas al ser relacionadas con las variables e_0 y los parámetros físico-mecánicos del suelo ofrecen el aspecto mostrado en l fig. 8 a y b. De su análisis se concluye:

- La línea de tendencia general es que la rectangularidad óptima va disminuyendo a medida que se incrementa el ángulo de fricción o la cohesión.
- Para valores elevados de φ y c, la excentricidad va tomando valores diferentes de cero porque el diseño se torna crítico para otra combinación de carga, o sea como

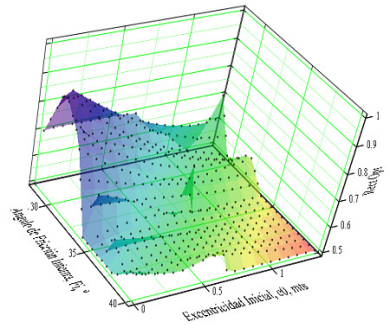


Columna 11 φ = 34⁰

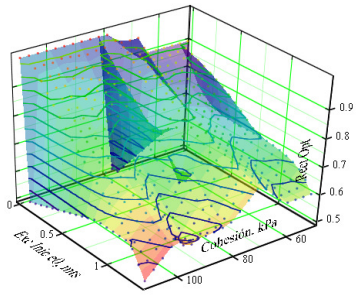


Columna 1, C=50 MPa, d=1.5, f'y= 300 MPa

Fig. 7 Influencia de la calidad de los Materiales.



Suelos friccionales.



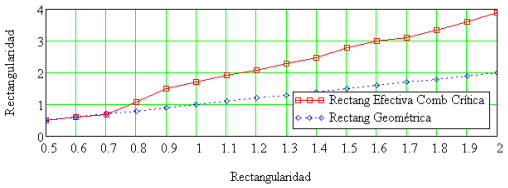
Suelos Cohesivos.

Fig. 8 Superficies Óptimas.

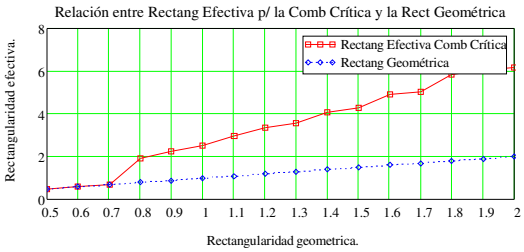
se incrementa la capacidad de carga del suelo la combinación que arroja mayor valor de e_0 es la que rige el diseño. Para valores de φ bajos ocurre un proceso contrario al anterior ya que la condición de capacidad de carga se vuelve crítica en muchos de los casos.

f) Diferencias entre la rectangularidad geométrica y la efectiva:
Un aspecto muy notorio resulta visible cundo graficamos la relación entre la rectangularidad efectiva y la rectangularidad geométrica, como se muestra en la fig. 9, a y b. De donde se concluye que la rectangularidad óptima es marcada por el punto en que se separa la rectangularidad efectiva de la geométrica, lo cual

determina un nuevo método para optimizar en este tipo de elementos.



Columna 2, C=50MPa, f´c= 25MPa, d= 1.5m



Columna 7 φ = 34º

Fig. 9 Relación excentricidad efectiva vs rectangularidad geométrica.

3 CONCLUSIONES:

Luego de haber formulado de forma completa el problema de diseño óptimo de cimentaciones, de acuerdo a la metodología propuesta podemos señalar como aspectos:

1. La rectangularidad tiene una influencia apreciable en el costo de la cimentación alcanzándose hasta un 35% de diferencia entre el costo máximo y el mínimo en suelo c y en un intervalo de 18 % hasta más de 34% en suelo f. La diferencia con respecto a la rectangularidad 1 es de hasta el 10%.
2. La calidad de los materiales como el hormigón no influyen en la obtención de la rectangularidad óptima, aunque si en el costo.
3. La rectangularidad óptima (RO) toma diferentes valores en función de la variación de la excentricidad inicial y de los parámetros mecánicos:

a. Para valores de φ bajos se concluye que:

Para columnas con $e_0 = 0$, la RO es 0.8.

Para valores de e_0 en el intervalo $0 < e_0 < 0.5$ m, la RO oscilan entre 0.7 y 0.8.

Si e_0 está entre 0.5 m y 1 m la RO varía entre 0.7 y 0.6.

Si e_0 es mayor que 1 m, la RO está cercana a 0.5.

b. Mientras que para valores de φ altos:

4. La RO no varía con la excentricidad, siendo su valor de 0.5.
5. Para Suelos c:
6. Para excentricidades de 0 a 0.5 la RO se encuentra entre 0.9 y 0.7,
7. Para excentricidades de 0.5 a1 la RO se encuentra entre 0.7 y 0.6,
8. Para excentricidades iniciales entre 1 y 1.5 la RO estaría entre 0.6 y 0.5.
9. Sin embargo, estos valores deben tomarse con un sentido orientativo y no como absolutos, pues estos intervalos estarían definidos a partir de las características especificadas en los parámetros asignados, por lo que recomendamos usar la hoja de cálculo siempre que sea posible.

4 RECOMENDACIONES:

1. Mejorar la hoja de cálculo para que sea susceptible de ser usada por estudiantes de años superiores y proyectistas durante el proyecto de cimentaciones superficiales, incluyendo todos los tipos de suelos y ampliando las posibilidades de parámetros deformacionales de los suelos de la base, el diseño automático por el segundo estado límite y otras adecuaciones.
2. Utilizar la hoja de cálculo en vez de las recomendaciones sobre los valores de rectangularidades óptimos a utilizar siempre que se disponga de la misma, puesto que los mismos tienen más que todo un carácter orientativo para el proyectista.
3. Extender los análisis realizados a otros tipos de edificios sociales, como los construidos para escuelas, hospitales, etc, en donde la invariante Cargas que juega un papel muy importante como hemos visto, resulta diferente. Igualmente se recomienda extender los análisis efectuados para otros tipos de suelos (suelos c-φ).

5 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:

1. Castellanos, J.(2000). Procedimiento General para el diseño óptimo de estructuras. Aplicaciones en vigas de H. A. Tesis de grado de Doctor en Ciencias Técnicas, ISPJAE, Ciudad Habana.
2. Chagoyén M., E. L., Broche L., J. L. (2002) Diseño Estructural de Cimentaciones. Propuesta de Norma no publicada, Capítulo 25 en NC 53-039:2002 Cálculo y Proyecto de Estructuras de Hormigón. Norma Cubana. Comité de Normas para el Cálculo de Estructuras de Hormigón. CONCEH. Ministerio de la Construcción. Ciudad Habana. Cuba.
3. Gómez D., Y., Morales, Z. (2000) Optimización de cimentaciones rectangulares aisladas. Trabajo de Diploma no publicado. UCLV. Santa Clara, Cuba.
4. MICONS (2008) Precios para la Construcción. PRECONS II. Ministerio de la Construcción. Ciudad de La Habana. Cuba.
5. Negrín H., A. (1988). Diseño Óptimo de Estructuras de Hormigón Armado a flexo-compresión. Tesis doctoral no publicada, Inst. de Ing. de la Construcción de Kiev (KICI).
6. _____ (2005): Un enfoque general sobre diseño óptimo de estructuras. Boletín Estadístico de la Construcción(2005). Cámara Hondureña de la Construcción. Tegucigalpa, Honduras.
7. Penado Rodríguez, M., Le Duc Phuc (1982a) “Nuevo método para el dimensionamiento óptimo de la base de un cimiento rectangular aislado. Primera Parte. Revista Ingeniería Civil. Ciudad de La Habana.
8. Penado Rodríguez, M., Le Duc Phuc (1982b) “Nuevo método para el dimensionamiento óptimo de la base de un cimiento rectangular aislado. Segunda Parte. Revista Ingeniería Civil. Ciudad de La Habana.

9. Quevedo S., G., Lima, R., R., Bien Tran Quoc (1983) Rectangularidad económica en cimentaciones superficiales aisladas. Revista Ingeniería Estructural y Vial. Ciudad de La Habana.
10. Quevedo S., G., (1994) Diseño de Cimentaciones Superficiales. Manual del Proyectista. UCLV. Santa Clara. Cuba.
11. Quevedo S., G., et al. (2002) Propuesta de Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales por Estados Límites no publicada. Ministerio de la Construcción. Ciudad de la Habana.
12. Ruiz A., S. (1996) El piso de hormigón como cimentación de naves industriales ligeras. Revista Ingeniería Estructural y Vial. Ciudad de La Habana.
13. Sowers, G. B., Sowers, G. F. (1978) Introducción a la Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. México, D. F.

6 RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar reconocimiento por su contribución a un numeroso grupo de personas que apoyaron la realización de este trabajo y su presentación en este evento.