Experiencia cubana en la utilización del Método de los Estados Límites y los Métodos Probabilísticos en el Diseño Geotécnico

Dr.Sc. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo*. Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora. Dra. Ing. Ana V. González-Cueto Vila. **Profesor Titular. Investigador Titular. Decano de la Facultad de Construcciones. Universidad Central de las Villas, Cuba. Carretera a Camajuaní km 5½, Santa Clara, Cuba. Telef: 53 42 281655. e-mail: quevedo@uclv.edu.cu*

RESUMEN

Se presentan las experiencias acumuladas en Cuba por más de 20 años en la introducción y aplicación del Método de los Estados Límites y los Métodos Probabilísticos en el diseño geotécnico. Sobre la base de esas investigaciones se propone una metodología única para acometer los distintos diseños geotécnicos con el empleo del Método de los Estados Límites, ubicando a Cuba entre los países de avanzada mundial en el tema. Se distingue el procedimiento propuesto por la utilización de los métodos probabilísticos para la obtención del sistema de coeficientes de seguridad a utilizar en los diseños, realizando aportes internacionales, tanto desde el punto de vista teórico como práctico, a esta novedosa teoría. Por último se muestran algunos de los resultados obtenidos con la utilización de los procedimientos propuestos en la práctica ingenieril, demostrándose la efectividad técnica y económica de los mismos y las posibilidades de su generalización.

INTRODUCCIÓN

La aplicación del método de los estados límites, MEL, en el diseño geotécnico es una problemática de gran actualidad, desarrollada en lo fundamental solo por los países de más tradición en la materia como Rusia, Dinamarca, Estados Unidos y Canadá. En Cuba se comenzaron los estudios en esta dirección a mediados de la década de los ochenta, continuándose hasta el presente con el objetivo central de establecer una metodología general para el diseño geotécnico por el MEL en las condiciones cubanas. En el presente trabajo se sintetizan los principales resultados obtenidos en estas investigaciones, así como la introducción que se ha realizado de los mismos en la práctica ingenieril.
Se presenta un enfoque general para la aplicación del método de los estados límites, MEL, en las condiciones de Cuba, aportando todo el procedimiento matemático que respalda el mismo así como su aplicación a los principales problemas relacionados con el diseño geotécnico. Los sistemas de coeficientes de seguridad que se utilizan en dichos diseños son determinados con la aplicación de los métodos probabilístico, teoría de seguridad, considerados los de mayor actualidad y rigor científico a escala internacional. Se define toda la formulación matemática que facilita la aplicación de la teoría de seguridad así como una metodología integral para la calibración del sistema de coeficiente de seguridad a utilizar.
Por último se muestran algunas de las principales aplicaciones que se han hecho en estos años de todos los resultados anteriores, demostrando de forma categórica las ventajas técnico económicas de todos los procedimientos propuestos, así como los ahorros que se han cuantificado en las obras analizadas..

DESARROLLO

Metodología general para la aplicación del método de los estados límites en el diseño geotécnico en Cuba.

Se definirá la formulación matemática general para la introducción del método de los estados límites en el diseño geotécnico en Cuba, que permita establecer posteriormente, con un enfoque único, las formulaciones particulares para cada uno de los distintos diseños geotécnicos que se analicen. Como es conocido en la aplicación del MEL se definen los siguientes estados límites de diseño:
1er Estado Límite - Estado Límite de resistencia o estabilidad, conocido como estado límite último.
2er Estado Límite - Estado Límite de servicio, que para el caso del diseño geotécnico se convierte en el estado límite de deformación.
La ecuación de diseño para el 1er Estado Límite que se empleará es la que utiliza un sistema de tres coeficientes de seguridad parciales, tal y como se muestra en la formula [1].

$$Y_1^* \leq \frac{Y_2^*}{\gamma_S}$$

[1]
donde:

Y_1^* - Función de las cargas actuantes, con sus valores de cálculos.
Y_2^* - Función de las cargas resistentes, determinada con los valores de cálculo de las propiedades físico-mecánicas del suelo.
γ_s - Coeficiente de seguridad adicional.

Procedimiento para la aplicación del sistema de coeficiente de seguridad.
Definida la ecuación general a utilizar para la aplicación del MEL en el diseño geotécnico, debemos establecer el procedimiento de introducción de los coeficientes de seguridad parciales para la determinación de las funciones Y_1^* y Y_2^*.
Para el caso de las cargas actuantes, en el 1er Estado Límite, resumido en la figura # 1, se realiza lo mismos que para el diseño estructural, siendo sus ecuaciones generales las siguientes:

$$Y_{1i}^* = Y_{1ki} \cdot \gamma_{fi} \qquad [2]$$

$$Y_1^* = \sum_{i=1}^{n} Y_{1ki} \cdot \gamma_{fi} \qquad [3]$$

donde: Y_{1i}^* - Valor de cálculo de la carga i.
Y_{1ki} - Valor característico de la carga i.
γ_{fi} - Coeficiente de seguridad de la carga i.

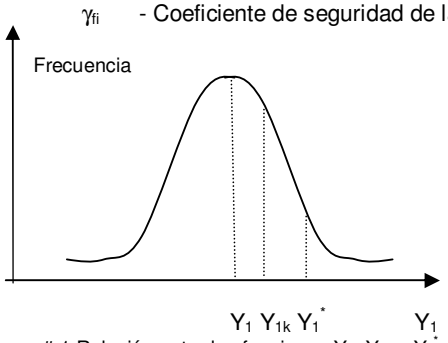

Figura # 1 Relación entre las funciones Y_1, Y_{1k} y Y_1^*

De la figura 1 se puede obtener la expresión para la determinación del coeficiente de seguridad parcial de las cargas actuantes, según:

$$\gamma_f = \frac{Y_1^*}{Y_1} \qquad [4]$$

El procedimiento propuesto para la determinación de la función de las cargas resistentes con sus valores de cálculo Y_2^* difiere del empleado tradicionalmente en el diseño estructural y plantea la aplicación de los coeficientes de seguridad de las propiedades físico-mecánicas del suelo directamente a sus valores medios, como se muestra en la figura # 2.

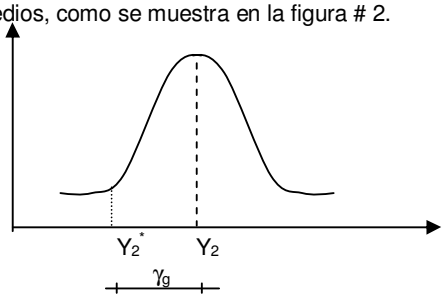

Figura # 2 Relación entre las funciones Y_2^* y Y_2 para el 1er estado límite.

De la figura # 2 se infiere que el coeficiente parcial de las cargas resistentes γ_g se obtiene de la relación entre la función de la capacidad resistente evaluada para los valores medios de las propiedades físico-mecánicas del suelo y para sus valores de cálculo.

$$\gamma_g = \frac{Y_2(x_i)}{Y_2^*(x_i^*)} \quad [5]$$

Relación entre los coeficientes parciales del MEL y el factor de seguridad global del MFSG.

Para la calibración del sistema de coeficiente de seguridad a utilizar por el MEL, resulta necesario establecer el procedimiento para la determinación del coeficiente de seguridad global K que se introduce en el MEL con la utilización de los coeficientes parciales. La relación entre dichos coeficientes parciales y el global se puede observar en la figura # 3.

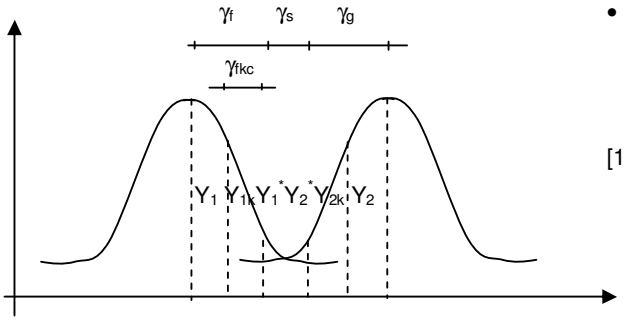

Figura # 3 Relación entre las funciones Y_1,Y_{1k}, Y_1^*,Y_2^*,Y_{2k} y Y_2 y los coeficientes parciales.

$$K = \gamma_f \cdot \gamma_g \cdot \gamma_s \quad [6]$$

Para realizar la comparación entre los coeficientes globales introducidos por el MEL y MFSG, resulta conveniente definir también el valor del coeficiente de seguridad global, medido de los valores característicos de las cargas actuantes a los valores medios de las cargas resistentes, K_{km}, el que se determina según:

$$K_{km} = \gamma_{fkc} \cdot \gamma_g \cdot \gamma_s \quad [7]$$

Formulación del método de los estados límites en diversos diseños geotécnicos en Cuba.

A partir de las metodologías generales definidas con anterioridad, para la aplicación del método de los estados límites y la teoría de seguridad en el diseño geotécnico, se han realizado en nuestro país diversas formulaciones de diseños específicos (Quevedo 1987,1989; Álvarez 1998; Diego 1998; Oliva 1999; González 1997,2000; Ibáñez 2001), cimentaciones superficiales, muros de sostenimiento de tierras, taludes y pilotes. Como resultado de dichas investigaciones contamos con metodologías establecidas con un enfoque único, que han ubicado a Cuba entre los países de avanzada en el ámbito internacional en la temática.

- Cimentaciones superficiales.

- Primer Estado Límite.

$$N^* \le b' \cdot l' \left[\frac{q_{br}^* - q'^*}{\gamma_s} + q'^* \right] \quad [8]$$

- Muros de sostenimiento de tierras.

- Condición de vuelco

$$\sum M^*_{Fuerzas\ desestabilizadas} \le \frac{\sum M^*_{F.Estabilizadas}}{\gamma_s} \quad [9]$$

- Condición de deslizamiento

$$\sum F^*_{H\ actuantes} \le \frac{\sum F^*_{H\ resistente}}{\gamma_s} \quad [10]$$

- Taludes

$$\sum M^*_{motores} \le \frac{\sum M^*_{resistente}}{\gamma_s} \quad [11]$$

- Pilotes.

- Chequeo de la carga vertical

$$N^*_{pi} \le \frac{Q_v^*}{\gamma_s} \quad [12]$$

- Chequeo de la carga horizontal

$$H^*_{pi} \le \frac{Q_H^*}{\gamma_s} \quad [13]$$

Metodología general de aplicación de la teoría de seguridad en el diseño geotécnico en Cuba.

De los diferentes enfoques analizados para la aplicación de los métodos probabilísticos, conocidos por algunos autores como teoría de seguridad, partiremos del que define como ecuación de diseño la comparación entre el nivel de seguridad obtenido en el diseño $H_{diseño}$ y el nivel de seguridad requerido $H_{requerido}$.

$$H_{diseño} \ge H_{requerido} \quad [14]$$

Formulación matemática general para la aplicación de la teoría de seguridad.

Definida la ecuación básica para la aplicación de la teoría de seguridad, resulta necesario desarrollar toda la fundamentación matemática que permita su empleo en la práctica, siendo sus expresiones fundamentales las siguientes:

$$Y = Y_2 - Y_1 \quad [15]$$

$$\sigma_y^2 = \sigma y_1^2 + \sigma y_2^2 \quad [16]$$

donde: σ_Y - Desviación de la función resultante Y

σ_{Y1} - Desviación de la función Y_1

σ_{Y2} - Desviación de la función Y_2

Se puede establecer que el nivel de seguridad queda determinado a partir de evaluar la integral de la función de Laplace ϕ_n entre $-\beta$ y $+\infty$, tal y como mostramos:

$$H = \phi_n [-\beta, +\infty] \quad [17]$$

Considerando una distribución normal para función Y, tomando en cuenta las de propiedades de simetría de la misma y conociendo que dicha distribución evaluada

entre 0 y +∞ es igual a 0.5, puede definirse el nivel de seguridad como:

$$H = 0{,}5 + \phi_n[\beta] \qquad [18]$$

$$\phi_n[\beta] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta} e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot d_z \qquad [19]$$

Realizando transformaciones matemáticas con las ecuaciones anteriores y utilizando el concepto del coeficiente de seguridad adicional k, se puede obtener la ecuación que relaciona el nivel de seguridad H con el coeficiente de seguridad global k.

$$H = 0.5 + \phi_n \left[\frac{k-1}{\sqrt{v_{Y_1}^2 + k^2 v_{Y_2}^2}} \right] \qquad [20]$$

La ecuación [27] será la ecuación básica para la aplicación de la teoría de seguridad con el fin establecido, permitiendo una vez definido el valor del nivel de seguridad requerido $H_{requerido}$, encontrar con facilidad el coeficiente de seguridad óptimo $K_{óptimo}$, que debe ser empleado en el diseño, ver figura # 4.

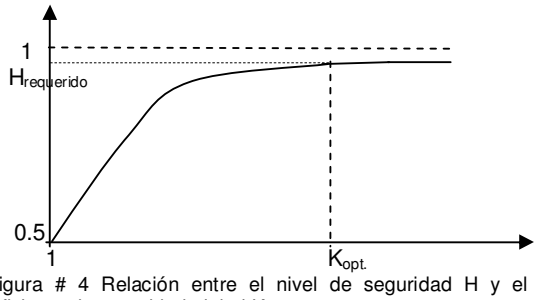

Figura # 4 Relación entre el nivel de seguridad H y el coeficiente de seguridad global K.

Para poder emplear la ecuación [20] resulta necesario establecer el procedimiento para obtener los coeficientes de variación de las funciones Y_1 yY_2, que a su vez están compuestas por varias variables aleatorias.

Aplicación de la teoría de seguridad en la calibración del sistema de coeficientes de seguridad a utilizar en el diseño de cimentaciones superficiales por el MEL.

Para mostrar los resultados obtenidos en la aplicación de la teoría de seguridad en el diseño geotécnico en Cuba se expondrá en detalle el procedimiento seguido para el caso de las cimentaciones superficiales en suelos predominantemente cohesivos, primera investigación realizada en el país en esta temática (Quevedo 1987), que ha constituido la base para la generalización a otros problemas dentro del campo de la geotecnia.

Para la aplicación de la teoría de seguridad se simplificará la ecuación [8], considerando que solo existe excentricidad de la carga en un plano de simetría, y por tanto l'= l, y que el coeficiente de seguridad adicional γ_s afecta a la capacidad de carga bruta q_{br}^* .Sobre la base de lo anterior obtenemos como ecuación de diseño la siguiente:

$$N^* \le b' \cdot l \left[\frac{q_{br}^*}{\gamma_s} \right] \qquad [21]$$

A continuación se expondrá la metodología general desarrollada para la aplicación de la teoría de seguridad.

I). Definición de los parámetros generales que intervienen en el análisis.

I.1). Caracterización estadística de todos los parámetros aleatorios considerados.

Para el caso del diseño geotécnico los parámetros aleatorios considerados son las cargas actuantes y las propiedades físico-mecánicas de los suelos, en específico se analizaron los coeficientes de variación del ángulo de fricción interna $v_{tg\varphi}$,de la cohesión v_c ,del peso específico v_γ ,de la carga muerta v_{cm} ,de la carga viva v_{cv} y de la carga de viento extremo v_{viento}

I.2). Diseño del experimento teórico.

Las variables analizadas para la aplicación de la teoría de seguridad la cohesión c el ángulo de fricción interna φ , el peso específico γ , la excentricidad de la carga e ,la inclinación de la carga δ y la profundidad de cimentación d.

I.3) Establecimiento del nivel de seguridad requerido $H_{requerido}$

Para el caso del diseño geotécnico por el 1er estado límite el $H_{requerido}$ a utilizar en la aplicación de los métodos probabilísticos es:

- $H_{requerido}$ = 0.98.

II). Determinación de los coeficientes de seguridad global de diseño $K_{diseño}$ y óptimo $K_{óptimo}$.

II.1). Establecimiento del aparato matemático.

Las expresiones para la determinación de los coeficientes parciales de las cargas actuantes γ_f y de las cargas resistentes γ_g introducidos en el diseño son:

$$\gamma_f = \frac{\dfrac{N^*}{(b-2e^*)\,\ell}}{\dfrac{N}{(b-2e)l}} \qquad [22]$$

$$\gamma_g = \frac{q_{br}}{q^*_{br}} \qquad [23]$$

Quedando definido de esta forma todas las expresiones para la determinación de γ_f y γ_g, mientras que el coeficiente de seguridad global de diseño $K_{diseño}$ se obtiene a partir de:

$$K_{diseño} = \gamma_f \cdot \gamma_g \cdot \gamma_s \qquad [24]$$

Para la determinación del coeficiente de seguridad óptimo que debe ser introducido en el diseño $K_{óptimo}$, resulta necesario inicialmente definir las funciones Y_1 y Y_2.

$$Y_1 = N \qquad [25]$$

$$Y_2 = Q_{br} = b' \cdot l \; [q_{br}] \qquad [26]$$

Quedando la ecuación que relaciona el nivel de seguridad H con el coeficiente de seguridad global K,

para el caso del diseño de las cimentaciones superficiales por capacidad de carga, definida por:

$$H = 0{,}5 + \phi_n \left[\frac{k-1}{\sqrt{v_N^2 + v_{Qbr}^2 \cdot k^2}} \right]$$

[27]

Los coeficientes de variación de la carga vertical actuante v_N y de la capacidad de carga v_{Qbr} se determinan según:

$$v_N = \frac{\sigma_N}{N} \qquad [28]$$

$$v_{Qbr} = \frac{\sigma_{Qbr}}{Q_{br}}$$

[29]

donde: σ_N - Desviación de la carga vertical actuante.

σ_{Qbr} - Desviación de la capacidad de carga de la base de la cimentación.

Para la determinación de σ_{Qbr} se aplica a la expresión de Q_{br} el método de linealización de la función y el teorema general de la desviación (Quevedo 1987), conocido por el método de desarrollo en series de Taylor (Blázquez 1984), obteniéndose:

$$\sigma_{Qbr}^2 = \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg\ \varphi}\right)^2 \cdot \sigma^2_{tg\varphi} + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial c}\right)^2 \cdot \sigma^2_c + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial \gamma}\right)^2 \cdot \sigma^2_\gamma + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial e}\right)^2 \cdot \sigma^2_e +$$

$$\left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg\ \delta}\right)^2 \cdot \sigma^2_{tg\delta} - 2\left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg\ \varphi}\right)\left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial c}\right) \cdot \sigma_{tg\varphi} \cdot \sigma_c \cdot r_{tg\varphi c}$$

[30]

Por último la desviación de las cargas verticales, se determinan a partir de:

$$\sigma_N^2 = \sum \sigma_{Ni}^2$$

[31]

$$\sigma_{Ni} = v_i \cdot N_i$$

[32]

II.2). Creación de la base computacional.

II.3). Obtención de los valores de $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$ para todas las combinaciones definidas.

Una vez realizado el análisis de todas las variantes definidas, con la ayuda de la base computacional creada, es necesario consolidar la cuantiosa información obtenida de forma tal que se facilite su valoración y el arribo de las conclusiones parciales de esta parte de la investigación. Para el problema en estudio los resultados obtenidos fueron resumidos en la tabla # 1.

Coeficientes de variación.	Intervalo de variación.			
	γ_f	γ_g	$K_{diseño}$	$K_{requerido}$
$v_{tg\varphi}$ = 0.07 v_c = 0.138	1.48 ~ 1.76	1.28 ~1.51	1.89 ~ 2.65	1.3 ~ 1.6
$v_{tg\varphi}$ = 0.20 v_c = 0.26	1.42 ~ 1.68	1.65 ~ 2.61	2.34 ~ 4.38	1.5 ~ 2.1
$v_{tg\varphi}$ = 0.26 v_c = 0.336	1.37 ~ 1.63	1.99 ~ 3.78	2.72 ~ 6.16	1.9 ~ 2.6

Tabla # 1 Valores de los coeficientes γ_f, γ_g, $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$

II.4). Valoración de los resultados y formulación de las conclusiones parciales.

Los resultados obtenidos demuestran que en los diseños realizados siempre ocurrió que los valores de los coeficientes de seguridad global introducidos, $K_{requerido}$, son superiores que los óptimos, $K_{requerido}$, necesarios para lograr el nivel de seguridad requerido $H_{requerido}$, lo que indica que por el procedimiento establecido de aplicación de los coeficientes parciales en el MEL se obtienen coeficientes de seguridad superiores que los requeridos y por tanto diseños no racionales.

III). Calibración de los coeficientes de seguridad.

III.1) Análisis de la influencia de las principales variables en los valores de $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$.

En el trabajo se realizaron los análisis de la influencia de todas las variables aleatorias consideradas en los valores de $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$. En la figura # 5 se muestran los resultados del análisis para la influencia del coeficiente de variación $v_{tg\varphi}$, pero integrado en la misma la variación del $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$ para todas las combinaciones analizadas, lo que permite valorar comparativamente las leyes de variación de ambos parámetros con respecto a la variable de estudio.

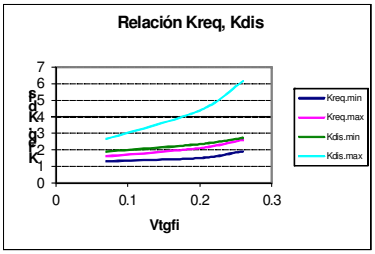

Figura # 5. Relación del $K_{requerido}$ y el $K_{diseño}$ con $v_{tg\varphi}$

Se realizaron además la valoración de la influencia de las restantes variables, coeficiente de variación de la cohesión v_c, excentricidad e y ángulo de inclinación de la carga δ, sobre los valores del $K_{diseño}$ y $K_{requerdio}$.

III.2). Determinación de las combinaciones pésimas en cuanto a la relación $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$.

Las combinaciones pésimas obtenidas son:

- Ángulo de fricción interna ⟶ El menor posible $\varphi = 5^{\circ}$
- Excentricidad de la carga ⟶ La mayor posible e = b/3
- Inclinación de la carga ⟶ La mayor posible $\delta = 10^{\circ}$

III.3). Calibración del sistema de coeficiente de seguridad a utilizar en el MEL.

Este es un proceso netamente ingenieril, y en el mismo con toda la información disponible de los análisis anteriores se establecerá un nuevo sistema de coeficientes de seguridad a emplear en el diseño de las cimentaciones superficiales por el MEL, de forma tal que se garantice para todos los posibles casos la seguridad requerida, obteniéndose para los más críticos el cumplimiento de $K_{diseño} = K_{requerido}$ y por tanto $H_{diseño} = H_{requerido}$.

Para el caso del diseño de las cimentaciones superficiales, en suelos cohesivos, por estabilidad aplicando el MEL, los resultados de la calibración realizada se resumen en la tabla # 2.

Coeficiente de variación	Valores máximos de $\gamma_{tg\varphi}$ o γ_{gc}
$v_{tg\varphi} \leq 0.20$	$\gamma_{tg\varphi max} = 1.20$
$v_c \leq 0.26$	$\gamma_{gcmax} = 1.40$
$v_{tg\varphi} > 0.20$	$\gamma_{tg\varphi max} = 1.25$
$V_c > 0.26$	$\gamma_{gcmax} = 1.45$

Tabla # 2 Valores máximos de $\gamma_{tg\varphi}$ y γ_{gc} para suelos cohesivos en el 1er Estado Límite.

III.4). Obtención de los nuevos valores de los $K_{diseño}$ con los coeficientes calibrados

Con el nuevo sistema de coeficientes de seguridad propuesto se determinó todos los valores del $K_{diseño}$, resumiendo los mismos en la tabla # 3.

Coeficientes de variación.	Intervalo de variación.			
	γ_f	γ_g	$K_{diseño}$	$K_{requerido}$
$v_{tg\varphi} \leq 0.20$	1.42 ~ 1.76	1.21 ~ 1.92	1.71 ~ 3.38	1.3 ~ 2.1
$v_c \leq 0.26$				
$v_{tg\varphi} > 0.20$	1.37 ~ 1.63	1.44 ~ 2.17	1.98 ~ 3.54	1.9 ~ 2.6
$v_c > 0.26$				

Tabla #3 Variación de los coeficientes γ_f, γ_g, $K_{diseño}$ y $K_{requerido}$ obtenidos.

Se realizó con los nuevos coeficientes de seguridad un análisis similar al llevado a cabo en III.1, mostrándose en la figura # 6 como variaron los mismos con respectos a los obtenidos anteriormente sin la limitación de los coeficientes.

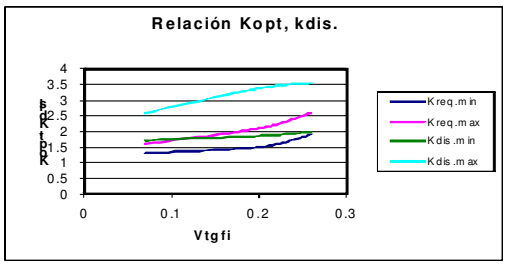

Figura # 6. Relación de $K_{requerido}$ y $K_{diseño}$ con $v_{tg\varphi}$.

III.5). Valoración de los resultados y formulación de las conclusiones.

Si analizamos comparativamente las figuras # 5 y 6 se puede apreciar que al limitar los valores de los coeficientes $\gamma_{tg\varphi}$ y γ_{gc}, se reduce de forma significativa el $K_{diseño}$, sobre todo sus valores máximos, mientras que el $K_{requerido}$ apenas cambia, obteniéndose una zona entre las curvas del $K_{requeridomax}$ y $K_{diseñomin}$, donde de seguro están las combinaciones críticas para las cuales se calibraron los coeficientes.

IV). Validación práctica de los resultados.

Para la valoración práctica de los principales aportes realizados a la metodología de diseño de cimentaciones superficiales en suelos cohesivos analizaremos los resultados obtenidos en el diseño de las cimentaciones de una nave industrial del proyecto típico.

Los diseños de las cimentaciones se realizaron por tres procedimientos, el método de los estados límites según la metodología propuesta, con el sistema de coeficientes de seguridad obtenido a partir de la aplicación de los métodos probabilísticos, que lo identificaremos como MEL propuesto, el método de los estados límites con el sistema de coeficientes de seguridad obtenidos de la aplicación de la estadística, que lo identificaremos como MEL sin limitar y el método del factor de seguridad global con K_{km}= 3, que lo identificaremos como MFSG. Los resultados obtenidos de dichos diseños se muestran en la tabla # 4.

De los resultados obtenidos se pueden realizar numerosos valoraciones que ratifican varios de los postulados considerados en el presente trabajo, siendo las principales las siguientes:

- En los cimientos interiores, que trabajan a carga axial con excentricidad cero, se requiere por el MEL propuesto coeficientes de seguridad menores que para los cimientos externos que si tienen cargas excéntricas.
- Se demuestra la racionalidad del MEL propuesto con respecto al MFSG, utilizado con mucha frecuencia en la práctica, obteniéndose ahorros del costo directo de la cimentación del orden del 23 ~ 38% en dependencia del tipo de cimiento y del tipo de suelo.

Cimiento	I. MEL propuesto			II. MEL sin imitar			% ahorro	III. MFSG			% ahorro
	B(m)	K_{mm}	K_{km}	B(m)	K_{mm}	K_{km}	I ~ II	B(m)	K_{mm}	K_{km}	I ~ III
Interno.	2.30	2.25	1.80	2.40	2.41	1.93	8.7 %	2.90	3.75	3.0	37.9 %
Externo	2.60	2.76	2.22	2.65	2.80	2.24	5.0 %	2.90	3.75	3.0	23.0 %

Tabla # 4 Resultados de los diseños.

Sistema de coeficientes de seguridad para el diseño geotécnico por el MEL en Cuba.

Siguiendo la metodología desarrollada para la aplicación de los métodos probabilísticos con el objetivo de obtener el sistema de coeficientes de seguridad a utilizar en el diseño geotécnico por el MEL, se han llevado a cabo en Cuba un conjunto de investigaciones (Quevedo 1987, 1988, 1999, 2000; Álvarez 1998; Diego 1998; Oliva 1999; González 1997,2000; Ibáñez 2001) que han abarcado el estudio de los siguientes problemas:

- Cimentaciones Superficiales.
- Muros de Sostenimiento de Tierras.
- Taludes.
- Pilotes.

En las tablas # 5 se muestran los sistemas de coeficientes de seguridad unificados, para suelos cohesivos, igualmente se confeccionó una para el caso

de los suelos friccionales a utilizar para el diseño geotécnico por el MEL.

Suelos predominantemente Cohesivos. ($c \neq 0$; $\varphi \leq 25^{\circ}$)

Aplicaciones	Estado Límite / Nivel de seguridad	Coeficientes $\gamma_{gtg\varphi max}$ o γ_{gcmax}			
		$V_c \leq 0.26$	$v_c > 0.26$	$v_{tg\varphi} \leq 0.20$	$V_{vg\varphi} > 0.20$
• Cimentaciones Superficiales. • Taludes.	1er Estado Límite/H=0.98 1er Estado Límite/H=0.95	γ_{gc}=1.40	γ_{gc}=1.45	$\gamma_{gtg\varphi}$= 1.20	$\gamma_{gtg\varphi}$= 1.25
• Cimentaciones Superficiales. • Muros.	2do Estado Límite/H=0.85 1er Estado Límite/H=0.98	γ_{gc}=1.30	γ_{gc}=1.35	$\gamma_{gtg\varphi}$= 1.10	$\gamma_{gtg\varphi}$= 1.15
• Pilotes.	1er Estado Límite/H=0.98	γ_{gc}=1.20	γ_{gc}=1.40	-	-

Tabla # 5 Sistema de coeficientes de seguridad general para suelos cohesivos.

CONCLUSIONES

1. A partir de la experiencia internacional y de los resultados de las investigaciones realizadas, se propone un procedimiento general para la introducción del MEL en el diseño geotécnico en Cuba, que se distingue por el empleo de un sistema de tres coeficientes de seguridad parciales, uno relacionado con las cargas actuantes, otra con las características físico-mecánicas de los suelos y un tercero de seguridad adicional, y del cual se definió el aparato matemático general que respalda su aplicación racional en cualquier problema de diseño geotécnico que se aborde.
2. Se establece el aparato matemático general para la aplicación de la teoría de seguridad, métodos probabilísticos, enunciándose la solución de varios problemas no tratados en la literatura internacional, tales como el análisis de funciones con variables aleatorias correlacionadas. Se demuestra por primera vez la coincidencia entre los enfoques de las dos escuelas fundamentales en la temática, la occidental y la rusa, a la hora de aplicar los métodos probabilísticos. El aparato matemático creado puede ser utilizado en cualquier problema geotécnico que se estudie.
3. Se propone una metodología general para la aplicación de los métodos probabilísticos en el diseño geotécnico, que se distingue por combinar de forma creativa la rigurosidad matemática de los mismos con las soluciones ingenieriles, de forma tal que los resultados obtenidos puedan ser introducidos con facilidad en la práctica.
4. A partir de las investigaciones realizadas y de la valoración de la experiencia internacional se logra resumir la caracterización estadística de las principales variables aleatorias que intervienen en los diseños geotécnicos, cargas actuantes y propiedades físico-mecánicas de los suelos, facilitando con ello la aplicación de los métodos probabilísticos en cualquier problema geotécnico que se quiera abordar.
5. Sobre la base de los resultados obtenidos con la aplicación de la teoría de seguridad en la determinación del sistema de coeficientes de seguridad de varios problemas geotécnicos, cimentaciones superficiales, muros, taludes y pilotes, se demostró la efectividad práctica de la metodología general propuesta, enunciando además un sistema de coeficientes de seguridad general, distintivo para suelos cohesivos y suelos friccionales, aplicable al diseño geotécnico por ambos estados límites de cualquiera de los problemas estudiados.
6. A partir de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología general para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales se demuestra la efectividad técnico-económica de la misma, cuantificando además la influencia de cada uno de los aspectos novedosos introducidos en el diseño, obteniéndose de forma general ahorros en el orden del 15 ~ 40 % del costo directo de la cimentación, en dependencia del procedimiento utilizado en el diseño con que se compare y de las particularidades de los suelos y de las cargas actuantes de la estructura estudiada.

NOMENCLATURA

•

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Álvarez Gil, L. “La Estabilidad de Cortinas de Presas de Tierra mediante la solución de los Estados tenso-deformacionales y la Aplicación de la Teoría de Seguridad” Dr. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor-TGC; UCLV-(Const.) 127 pp, 1998.

Becker D. E. “Eighteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Limit States Design for Foundations. Part I. An overview of the foundation design process.” Canadian Geotechnical Journal 33: 956 – 983. 1996.

Blazquez Martínez, R. Geoestadística aplicada a la mecánica de suelos / R. Martínez Blazquez – CEDEX : Madrid, - 1949 pág. 1984.

González - Cueto, Ana Virginia. “Diseño de cimentaciones superficiales en arenas. Aplicación de la

Teoría de Seguridad." Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor--TM; UCLV--(Const). 70 pág. 1997.

González - Cueto, Ana Virginia. "Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales en Arenas." Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor--TGC; UCLV--(Const). 132 pág. 2000.

Ibáñez, L.O.. "Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática."Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor--TGC; UCLV--(Const). 113 pág. 2001.

Meyerhof, G. G., "Safety factors in soil mechanics" Canadian Geotechnical Journal. 7: 349 – 355, 1970.

Meyerhof, G. G., "Development of geotechnical limit state design." Canadian Geotechnical Journal 32: 128 – 136, 1995.

Oliva González, A. "Análisis de la estabilidad y seguridad de Taludes" Dr. Celestino González Niciesa, tutor, Dr. Gilberto Quevedo, consultante, -TGC, Universidad de Oviedo, 233pp, 1999.

Orr, T. L; Farrell, E. R. "Geotechnical design to Eurocode 7" Springer-Verlag. London. 166 pag., 1999

Quevedo Sotolongo, G. "Aplicación de la Teoría de la Seguridad al diseño de las cimentaciones por deformación." Revista Ingeniería Estructural. 1(IX) : 77 - 88; 1988.

Quevedo Sotolongo, G. "Aplicación de la Teoría de la Seguridad al diseño de las cimentaciones por estabilidad" Revista Ingeniería Estructural. 2(IX) : 121 - 134; 1988.

Quevedo Sotolongo, G. "Aplicación del Método de los Estados Límites en el diseño de las cimentaciones superficiales." Revista Ingeniería Estructural. 2(III): 95 - 106; 1987.

Quevedo Sotolongo, G. "Determinación del área de la base de cimentaciones superficiales : Método de cálculo." UCLV. (Const); 87 pág. 1989.

Quevedo Sotolongo, G. "Optimización y proyección de cimentaciones de edificaciones industriales en las condiciones de Cuba." – TGC; Moscú (MICI); -- 196 pág. 1987.

Quevedo Sotolongo G,; González-Cueto A. V. "Análisis de la seguridad en el diseño de cimentaciones en arenas. Criterio de Estabilidad" Ingeniería Civil No. 119,CEDEX, Madrid, 2000.

Quevedo Sotolongo, G.; González - Cueto, A. V., "Análisis de la seguridad en el diseño de cimentaciones en arenas. Criterio de deformación." Rev, Perfiles de la Ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Perú. Diciembre /1999.

Sánchez, S. "Diseño Geotécnico de Cimentaciones por Estados Límites en el Perú"; Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor. –TD; UPC. , 122 pág. 2002.