

Aplicación de los métodos probabilísticos en la obtención de los coeficientes de seguridad para el diseño geotécnico en Cuba

Gilberto Julio QUEVEDO SOTOLONGO^{a,1} y

Ana Virginia GONZÁLEZ-CUETO VILA^a

^aCIDEM, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Resumen. Los métodos probabilísticos han sido utilizados en las últimas décadas por investigadores dentro el campo de la geotecnia con el objetivo de determinar y/o calibrar los coeficientes de seguridad que se utilizan en el diseño geotécnico, fundamentalmente cuando se utiliza el método de los estados límites, obteniéndose resultados satisfactorios con coeficientes de seguridad más racionales y a su vez seguros. En Cuba se realizaron investigaciones en este campo en los últimos 30 años, que han ido desde la caracterización estadística de las principales propiedades físicas y mecánicas de los suelos cubanos hasta la obtención de los coeficientes de seguridad a utilizar en los diseños geotécnicos de cimentaciones superficiales, pilotes, taludes y muros de sostenimiento de tierras. En el presente trabajo se resume las experiencias obtenidas en estas investigaciones, desarrollando en detalle la aplicación de los métodos probabilísticos en la obtención de los coeficientes de seguridad para el diseño geotécnico por estados límites de las cimentaciones superficiales, mostrando además de forma general los resultados obtenidos en los otros diseños geotécnicos de pilotes, taludes y muros de sostenimiento de tierras. Se demuestra en el trabajo la efectividad de la aplicación de estos métodos, obteniéndose diseños seguros y más racionales, de igual forma se comparan los resultados obtenidos con investigaciones similares desarrolladas en varios países.

Palabras Clave. Métodos probabilísticos, coeficientes de seguridad, diseño geotécnico succión.

1. 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

¹ Autor de correspondencia: 1) Gilberto Julio Quevedo Sotolongo: Profesor Titular. Facultad de Construcciones. CIDEM. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. E-mail: quevedo@uclv.edu.cu. 2) Ana Virginia González-Cueto Vila: Profesora Titular. Facultad de Construcciones. CIDEM. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. E-mail: ana@uclv.edu.cu.

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.

2. Desarrollo

2.1. 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 $H_{\text{diseño}}$ y el nivel de seguridad requerido $H_{\text{requerido}}$.

$$H_{\text{diseño}} \geq H_{\text{requerido}} \quad (1)$$

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:

$$Y = Y_2 - Y_1 \quad (2)$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2 \quad (3)$$

donde: σ_y =desviación de la función resultante Y, σ_{y_1} =desviación de la función Y_1 , σ_{y_2} =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:

$$H = \phi_n [-\beta, +\infty] \quad (4)$$

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 $+\infty$ es igual a 0.5, puede definirse el nivel de seguridad como:

$$H = 0,5 + \phi_n [\beta] \quad (5)$$

$$\phi_n[\beta] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz \tag{6}$$

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.

$$H = 0.5 + \phi_n \left[\frac{k - 1}{\sqrt{vY_1^2 + k^2 vY_2^2}} \right] \tag{7}$$

La Ec. (7) 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 Hrequerido, encontrar con facilidad el coeficiente de seguridad óptimo Kóptimo, que debe ser empleado en el diseño, ver Figura 1.

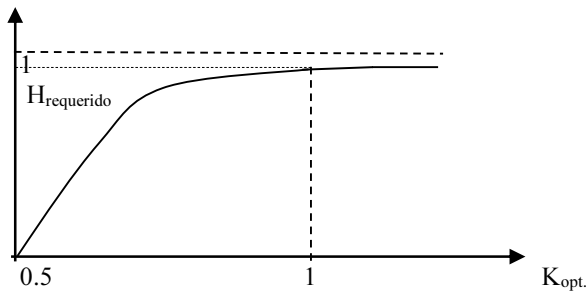


Figura 1. Relación entre el nivel de seguridad H y el coeficiente de seguridad global K.

Para poder emplear la Eq. (7) resulta necesario establecer el procedimiento para obtener los coeficientes de variación de las funciones Y1 y Y2, que a su vez están compuestas por varias variables aleatorias.

2.2. 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 [1] 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 para el diseño por el primer estado límite, considerando que solo existe excentricidad de la carga en un plano de simetría, y por tanto l' = 1, y que el coeficiente de seguridad adicional γs afecta a la capacidad de carga bruta qbr*. Sobre la base de lo anterior obtenemos como ecuación de diseño la siguiente:

$$N^* \leq b \cdot l \left[\frac{q_{br}^*}{\gamma_s} \right] \quad (8)$$

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 $\tan \phi$, de la cohesión c , del peso específico γ , de la carga muerta v_m , de la carga viva v_v y de la carga de viento extremo 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 1^{er} 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:

$$\gamma_f = \frac{N^*}{\frac{(b - 2e^*) \ell}{(b - 2e)l}} \quad (9)$$

$$\gamma_g = \frac{q_{br}^*}{q_{br}} \quad (10)$$

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:

$$K_{diseño} = \gamma_f \cdot \gamma_g \cdot \gamma_s \quad (11)$$

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 .

$$Y_1 = N \quad (12)$$

$$Y_2 = Q_{br} = b' \cdot l [q_{br}] \tag{13}$$

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:

$$H = 0,5 + \phi_n \left[\frac{k - 1}{\sqrt{v_N^2 + v_{Qbr}^2 \cdot k^2}} \right] \tag{14}$$

Los coeficientes de variación de la carga vertical actuante vN y de la capacidad de carga vQbr se determinan según:

$$v_N = \frac{\sigma_N}{N} \tag{15}$$

$$v_{Qbr} = \frac{\sigma_{Qbr}}{Q_{br}} \tag{16}$$

donde: σ_N =desviación de la carga vertical actuante y 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 Qbr 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:

$$\begin{aligned} \sigma_{Qbr}^2 = & \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg \varphi} \right)^2 \cdot \sigma_{tg \varphi}^2 + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial c} \right)^2 \cdot \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial \gamma} \right)^2 \cdot \sigma_\gamma^2 + \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial e} \right)^2 \cdot \sigma_e^2 + \\ & \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg \delta} \right)^2 \cdot \sigma_{tg \delta}^2 - 2 \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial tg \varphi} \right) \left(\frac{\partial Q_{br}}{\partial c} \right) \cdot \sigma_{tg \varphi} \cdot \sigma_c \cdot r_{tg \varphi c} \end{aligned} \tag{17}$$

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

$$\sigma_N^2 = \sum \sigma_{Ni}^2 \tag{18}$$

$$\sigma_{Ni} = v_i \cdot N_i \tag{19}$$

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.

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

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

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 # 2 se muestran los resultados del análisis para la influencia del coeficiente de variación $vtg\phi$, 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.

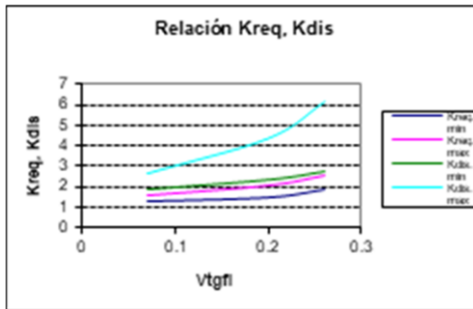


Figura 2. Relación del $K_{requerido}$ y el $K_{diseño}$ con $V_{\gamma\phi}$

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 $K_{requerido}$.

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

Las combinaciones pésimas obtenidas son:

- Ángulo de fricción interna \longrightarrow El menor posible $\varphi = 5^\circ$
- Excentricidad de la carga \longrightarrow La mayor posible $e = b/3$
- Inclinación de la carga \longrightarrow 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 $K_{\text{diseño}} = K_{\text{requerido}}$ y por tanto $H_{\text{diseño}} = H_{\text{requerido}}$.

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.

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

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

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

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

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

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

Se realizó con los nuevos coeficientes de seguridad un análisis similar al llevado a cabo en III.1, mostrándose en la Figura 3 como variaron los mismos con respecto a los obtenidos anteriormente sin la limitación de los coeficientes.

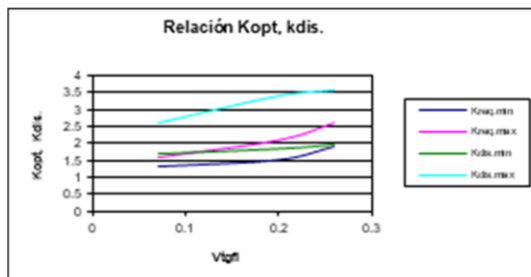


Figura 3. Relación de $K_{requerido}$ y $K_{diseño}$ con $v_{tg\phi}$.

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

Si analizamos comparativamente las Figuras 2 y 3 se puede apreciar que al limitar los valores de los coeficientes $\gamma_{tg\phi}$ 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.

2.3. 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 la Tabla 4 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.

Tabla 4 Sistema de coeficientes de seguridad general para suelos cohesivos.

Suelos predominantemente Cohesivos. ($c \neq 0$; $\phi \leq 25^\circ$)					
Aplicaciones	Estado Límite / Nivel de seguridad	Coeficientes $\gamma_{gtg\phi max}$ o $\gamma_{gc max}$			
		$V_c \leq 0.26$	$V_c > 0.26$	$V_{tg\phi} \leq 0.20$	$V_{tg\phi} > 0.20$
Cimentaciones Superficiales.	1 ^{er} Estado Límite/H=0.98	$\gamma_{gc}=1.40$	$\gamma_{gc}=1.45$	$\gamma_{gtg\phi}=1.20$	$\gamma_{gtg\phi}=1.25$
Taludes.	1 ^{er} Estado Límite/H=0.95				
Cimentaciones Superficiales.	2 ^{do} Estado Límite/H=0.85	$\gamma_{gc}=1.30$	$\gamma_{gc}=1.35$	$\gamma_{gtg\phi}=1.10$	$\gamma_{gtg\phi}=1.15$
Muros.	1 ^{er} Estado Límite/H=0.98				
Pilotes.	1 ^{er} Estado Límite/H=0.98	$\gamma_{gc}=1.20$	$\gamma_{gc}=1.40$	-	-

3. Conclusiones

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

Referencias

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Blazquez Martínez, R. Geostatística aplicada a la mecánica de suelos / R. Martínez Blazquez – CEDEX: Madrid, - 1949 pág. 1984.
- [4] 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.
- [5] González - Cueto, Ana Virginia. "Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales en Arenas." Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor--TGC; UCLV--(Const). 132 pág. 2000.
- [6] 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.
- [7] Meyerhof, G. G., "Safety factors in soil mechanics" Canadian Geotechnical Journal. 7: 349 – 355, 1970.
- [8] Meyerhof, G. G., "Development of geotechnical limit state design." Canadian Geotechnical Journal 32: 128 – 136, 1995.
- [9] 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.
- [10] Orr, T. L; Farrell, E. R. "Geotechnical design to Eurocode 7" Springer-Verlag. London. 166 pag., 1999

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Quevedo Sotolongo, G. "Determinación del área de la base de cimentaciones superficiales: Método de cálculo." *UCLV. (Const)*; 87 pág. 1989.
- [15] Quevedo Sotolongo, G. "Optimización y proyección de cimentaciones de edificaciones industriales en las condiciones de Cuba." – TGC; Moscú (MICI); -- 196 pág. 1987.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Sánchez, S. "Diseño Geotécnico de Cimentaciones por Estados Límites en el Perú"; Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor. –TD; UPC., 122 pág. 2002.