

Título: Métodos No Lineales para el cálculo de asentamientos en cimentaciones superficiales en suelos friccionales.

Autores: Dr. Ana Virginia González – Cueto
Dr. Cs. Gilberto Quevedo Sotolongo

CIDEM, Facultad de Construcciones. Universidad Central de Las Villas. Carretera a Camajuaní, Km 5
½, Santa Clara, Villa Clara. Cuba

Teléfono: 42 28 10 65, Teléf/Fax: 42 28 15 39

Año de Realización: 2006

Email: ana@uclv.edu.cu, quevedo@uclv.edu.cu

Introducción.

En estudios realizados a través de los años se ha demostrado que los suelos friccionales presentan valores límites muy bajos de esfuerzos que garanticen un comportamiento lineal; por lo que se ha demostrado que limitar el cálculo de las deformaciones a métodos lineales desaprovecha las capacidades resistentes de los mismos, ya que por el estado de estabilidad son muy resistentes.

Por este motivo, se propone la implementación de un método no lineal para el cálculo de los asentamientos, el cual ha sido verificado con resultados obtenidos de ensayos de pruebas de Carga sobre Placa "in situ" realizados en varios lugares del país; los que han demostrado la eficacia del método, y su mayor precisión en las zonas de trabajo real tenso – deformacional del suelo, correspondiente al estado tensional del segundo estado límite de diseño.

Deformaciones en suelos puramente friccionales.

En estos suelos, con excepción de las zapatas de ancho hasta 1 m aproximadamente, suele ser el criterio de deformación el que define la carga admisible del suelo. En las condiciones de Cuba, esto ocurre de forma similar, siempre y cuando las cargas actuantes que primen no presenten grandes excentricidades debido a las cargas de viento o uso de corta duración.

Según se conoce, en las arenas, la mayor parte del asiento se puede considerar de ocurrencia inmediata y la forma del contorno de los asientos parece indicar que en estos suelos el módulo de deformación crece con la profundidad. (J Salas 1981). Por este motivo los métodos de cálculo empleados en la práctica suelen estar basados en ensayos "in situ", esencialmente el **ensayo de placa de carga (PLT)**, el **ensayo de penetración normal (SPT)** y el **ensayo de penetración del cono (CPT)**.

En la actualidad existen varias tendencias, bien definidas, sobre los métodos y la metodología más adecuada a seguir para el cálculo de los asentamientos en arenas. Unos toman como bases los resultados que se obtienen directamente de los ensayos de suelo y aplican correlaciones a estos parámetros; otros parten de expresiones empíricas totalmente, pero en ambos casos garantizan la linealidad del suelo; y existe una tercera tendencia al cálculo de asentamientos por métodos no lineales.

Cálculo de asentamientos a partir de modelos lineales.

Durante años los métodos más utilizados para el cálculo de los asentamientos han sido los basados en modelos lineales. En los cuales se garantiza el comportamiento lineal del suelo garantizando que la tensión actuante en el suelo sea menor que la Tensión Límite de Linealidad para las cargas de servicio, como lo hace la escuela rusa. (Quevedo 1989) Y en otros casos, como son las tendencias occidentales, con la introducción de altos coeficientes de seguridad, o suponiendo que el suelo se encuentra en las condiciones de falla local. (J. Badillo 1970, Sowers 1979)

Haciendo cumplir cualquiera de las condiciones planteadas anteriormente se llegan a soluciones lineales; y para determinar las deformaciones se trabaja en la zona lineal de la curva tensión deformación, para lo cual existen varios métodos de cálculo.

Método Lineal del cálculo de asentamientos.

El cálculo de los asentamientos por métodos lineales, ha sido lo más aplicado por la generalidad de los ingenieros geotécnicos. Y la mayoría de estos parten de definir los siguientes aspectos elementales:

☞ Parámetro deformacional que caracteriza el suelo; que en la mayoría de los casos, viene dado por el Módulo General de Deformación, (E_0) que hace al modelo lineal desde la definición de su material.

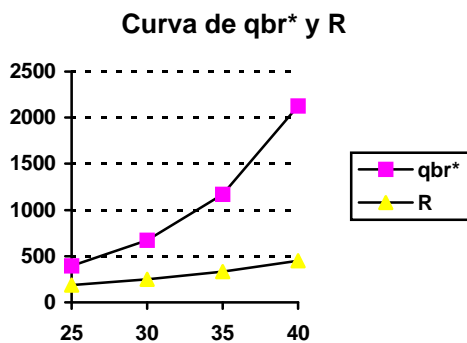
↗ Determinación del espesor de suelo donde se considera ocurren las deformaciones lineales; nombrada por varios autores como potencia activa (Ha).

↗ Introducción de coeficientes empíricos en las ecuaciones propuestas.

↗ Cálculo de las Tensiones por Carga impuesta en el suelo, a través de la discretización del gráfico que caracteriza esta distribución de presiones en el suelo, partiendo siempre de modelos lineales.

Entre los métodos lineales más conocidos y empleados, se encuentran, el Método de la Capa Equivalente definido por Tsitovish (1983), el de Potencia Limitada, el de Skempton – Bjerrum y el Método de Sumatoria de Capas, este último el más difundido y de mayor aplicabilidad en la actualidad.

Todos los métodos lineales de cálculo de asentamientos, de una u otra forma, tienen como premisa fundamental garantizar que el comportamiento del suelo sea lineal, lo cual implicará el no aprovechar la real capacidad portante de los suelos; ya que como se ha podido comprobar, en suelos puramente friccionales la diferencia entre ambos estados tensionales va a ser significativa en el proceso de diseño de una cimentación. Ver Figura 1.



Por todo lo expuesto anteriormente, se ha ido evidenciando la necesidad de buscar nuevos métodos para el cálculo de asentamientos que permitan un mejor aprovechamiento de las características tenso deformacionales de los suelos friccionales. Esto precisamente es lo que ha motivado esta investigación, y ha promovido la búsqueda de métodos que no precisen un comportamiento lineal del suelo, sino que el diseño de la cimentación esté encaminada a garantizar valores de asentamiento en la estructura menores a los límites reales permisibles del suelo, sin que

Figura 1.- Relación entre: qbr – capacidad de Carga del Suelo y R – Esfuerzo Límite de comportamiento Lineal del Suelo

se llegue al fallo por deformación, permitiendo resolver eficientemente la problemática real de los suelos friccionales.

Se han desarrollado procedimientos de cálculos de asentamientos basados en métodos No Lineales, con vistas a superar esta problemática, pues de esta forma el área de la base no se encontrará limitada a tener que garantizar un comportamiento lineal del suelo, sino que puede tener dimensiones menores, siempre y cuando cumpla con las deformaciones límites permisibles. (Malishev 1972, Golsthein 1970) Pero estos procedimientos y métodos de cálculo, se hace imprescindible demostrar la factibilidad de su aplicabilidad a las condiciones de Cuba, a través del empleo de métodos teóricos y experimentales con una adecuada fundamentación científica y práctica.

Método No Lineal del cálculo de asentamientos

Para la aplicación de estos métodos para el cálculo de asentamientos y la veracidad de sus resultados, se realizó un proceso de validación del mismo a través de ensayos de Placas de Cargas realizados “in situ”, según el comportamiento real del suelo y las características propias de nuestro país.

Es en la SNIP (1975) donde se plantea por primera vez la posibilidad de calcular asentamientos superiores al límite de la tensión de linealidad, para lo cual se recomienda comprobar si el asentamiento lineal calculado es menor que el 40 % del límite permisible, es decir $S_{lineal} \leq 0.4 S_{limite}$. De cumplirse esta condición, propone una disminución del área de la base, considerando que la Tensión Límite de Linealidad, debido a las hipótesis sobre las cuales se obtiene su ecuación, permite incrementar su valor aun hasta un 20 % más y que todavía se estará en una zona de comportamiento lineal. Por lo que se podría calcular el área de la base para este nuevo valor de R, obteniéndose un valor más racional de las dimensiones de la base. Pero a pesar de estas consideraciones, se ha podido comprobar, que esto no da una respuesta eficaz a la problemática de las deformaciones en las arenas.

Todas estas posibles soluciones, fueron una primera aproximación empírica para resolver la problemática ya planteada, pues en la práctica se demostró que en muchos casos estas soluciones eran insuficientes, y fue necesario ir al cálculo de los asentamientos en la zona no lineal.

Partiendo de estas recomendaciones, Malyshev en 1982 propone, además de la posibilidad de recalcular las dimensiones de la base para un 1.2 R, determinar los asentamientos que se producirán en la base teniendo en cuenta un comportamiento no lineal del suelo; para lo cual propone el método de cálculo de asentamientos no lineales, que se expone a continuación.

En el método se propone tomar un comportamiento lineal del suelo hasta que este se encuentre trabajando a la tensión límite de linealidad, y para esta tensión, calcular los asentamientos lineales que se producen en la base; considerando entonces que a partir de ese punto el suelo se va a comportar como un medio no lineal (como sucede en la realidad), donde los asentamientos se determinarán por la expresión. Para cualquier valor de P actuante, superior a la tensión de linealidad establecida y a los cuales se les sumarán los asentamientos lineales que se producen en la zona de linealidad. Esta expresión lo que pretende es simular el comportamiento no lineal del suelo, a través de una ecuación que representa una trayectoria hiperbólica, partiendo del propio Módulo General de Deformación del Suelo (E_0), y teniendo en cuenta diferentes factores que influyen en el comportamiento del mismo, como se explica a continuación.

$$S_{\text{no lineal}} = hm \frac{P - P_1}{3E} \left\{ \frac{2(1 + \mu)}{P_2 - P_1} [P_2 - P_1 - (q_2 - q_1)] + \frac{1 - 2\mu}{P_2 - P_1} [P_2 - P_1 + 2(q_2 - q_1)] \right\} + S_{\text{lineal}}$$

En esta ecuación intervienen los siguientes factores:

P_1 - valor de la presión crítica inferior, que prefija un límite de comportamiento lineal del suelo.

P_2 - valor de la presión crítica superior de falla del suelo.

q_1, q_2 - componentes de la tensión de confinamiento lateral del suelo.

H_m - profundidad media para la cual se considera se producirán los asentamientos determinados.

P - presión media real actuante en el suelo, para la cual se determinan los asentamientos No Lineales.

E - Módulo General de Deformación del suelo.

μ - coeficiente de Poisson del suelo.

De forma resumida puede decirse que partiendo del Módulo General de Deformación (E_0) del suelo, se pueden calcular los asentamientos No Lineales, que se producen en una potencia de suelo (hm) para cualquier P actuante, que se encuentre comprendida entre los límites establecidos por P_1 y P_2 , es decir mayor a la tensión límite de linealidad e inferior a la resistencia de rotura del suelo. Debe señalarse que en el cálculo de los asentamientos no lineales, se encuentran incluidos los asentamientos lineales que se producen en el suelo para el estado tensional actuante, y los cuales deben ser determinados por el método de Sumatoria de Capas o por cualquier otro, que se estime tenga la precisión requerida.

Este método de cálculo de deformaciones no lineales, aunque parte del Módulo de Deformación General (E_0) como parámetro deformacional del suelo, no se compromete en ningún aspecto con modelos lineales; ya que el mismo no trabaja con el gráfico de tensiones por carga impuesta del suelo, y no necesita por tanto de una discretización del mismo; ya que el enfoque de este método va dirigido a reproducir el comportamiento tenso - deformacional real del suelo entre los puntos de tensiones P_1 y P_2 , a través de la expresión matemática desarrollada

Proceso de experimentación y verificación práctica del método No Lineal

Con vistas a comprobar los resultados que se obtienen con la aplicación del método de cálculo de asentamientos no lineales, se previó la realización de varios ensayos "in situ" de Carga sobre Placas en arenas, que se realizaron en Cayo Santa María, al Norte de la Provincia de Villa Clara.

El objetivo principal de estos ensayos es la determinación de los parámetros del suelo; se realizó el cálculo y comparación entre las curvas Esfuerzo - Deformación, para lo cual se programaron múltiples ensayos en los que se evaluó la influencia de la forma, las dimensiones y su profundidad de cimentación.

Se valoraron además, otra serie de ensayos de Carga sobre Placas realizados por la ENIA de la provincia de Matanzas, para la construcción de hoteles en diferentes parcelas de Varadero. Y de los cuales se dispuso de toda la información necesaria para realizar los análisis necesarios a las curvas de Esfuerzo - Deformación, y otras valoraciones de interés.

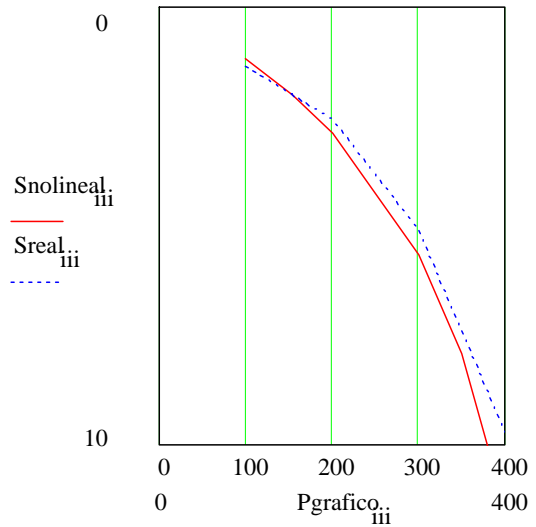
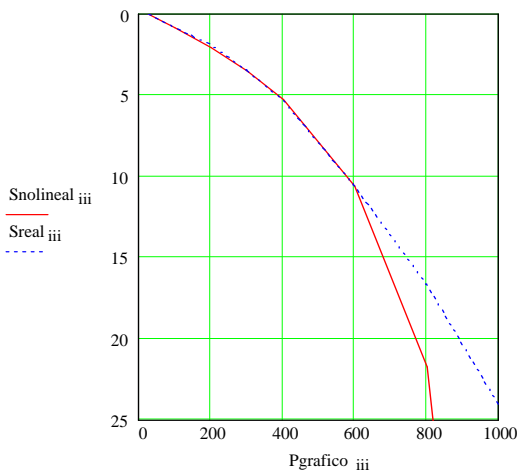
A continuación se exponen algunas curvas Esfuerzo - Deformación, obtenidas de los diferentes ensayos de cargas realizados en el Cayo Santa María y en la Playa de Varadero. En estas gráficas, se muestran además, las curvas resultantes de los cálculos de los asentamientos con la aplicación del método no lineal, explicado anteriormente. Donde se podrá comprobar el nivel de aproximación que brinda este método de cálculo, respecto al comportamiento real del suelo.

Ensayo del Hotel Tainos III

Diámetro = 0.277 m Profundidad = 1.0 m.

$q_{br} = 560.13 \text{ kN/m}^2$ $R = 153.97 \text{ kN/m}^2$.

Donde se puede observar una gran aproximación entre las curvas, desde la zona donde el suelo deja de comportarse linealmente (P1) hasta casi llegar a la tensión de rotura, (P2)



Ensayo de Cayo Santa Maria # 8

Diámetro = 0.4 m Profundidad = 1.0 m.

En este gráfico, igualmente se observa un comportamiento casi justo de la curva real y de la curva de cálculo de asentamientos no lineal, sobre todo en la zona real de desarrollo del estado tensional del Segundo Estado Límite.

Una zona que puede producir cierta incertidumbre en la aplicación del método, es la más cercana a la zona de falla, donde ambas curvas tienden a un comportamiento no muy cercano entre sí. Pero en esta zona no es de gran relevancia el comportamiento preciso de la curva de no linealidad, ya que al efectuar un diseño real, se introduce todo un sistema de coeficientes de seguridad en el diseño, que alejan el estado tensional que produce el cimiento de la falla del suelo, evitando que se llegue a esta zona de la curva.

Un ejemplo, donde se evidencia la veracidad de lo planteado se puede analizar tomando los resultados de uno de los ensayos analizados previamente. Donde se trabajó con un ángulo de fricción interna del suelo $\phi = 28^\circ$, y un peso específico $\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^3$, a una profundidad de 1.5 m.

Para este suelo, el valor de la Tensión Límite de Linealidad, en el 2^{do} Estado Límite, va a tomar un valor de, $R = 178.82 \text{ kN/m}^2$. Si este valor de R, se representa en la Figura 2, conjuntamente con el valor de q_{bt}^* , se puede apreciar que la zona donde se desarrollará el estado tensional para el 2^{do} Estado Límite, que estará entre estos dos valores, es de total precisión en los cálculos y por tanto los resultados que se obtienen por el Método No Lineal propuesto son acertados.

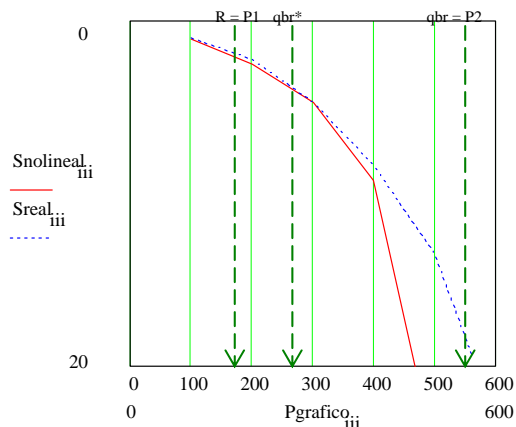


Figura. 2.- Curva Esfuerzo – Deformación según el Método No Lineal, y los resultados reales del ensayo.

Con estas características, la capacidad de carga de rotura normativa del suelo resultante será $q_{br} = 573.03 \text{ kN/m}^2$; pero en un diseño real con la introducción de los coeficientes de seguridad, esta capacidad de carga se reduce para estar del lado de la seguridad, y en este caso el valor de la capacidad de carga de rotura de cálculo será de $q_{br}^* = 453.19 \text{ kN/m}^2$. Si se analiza la curva tensión deformación que aparece en la Figura 2, y se plotea este resultado en la gráfica se verá que no se está en zona de incertidumbre.

Pero en un diseño real los cálculos no terminan en esta etapa. Aún queda por introducir un coeficiente de seguridad adicional γ_s , que disminuye más el estado tensional actuante en el suelo. Para lo cual resulta una capacidad de carga de trabajo igual a: $q_{bt}^* = 381.59 \text{ kN/m}^2$, para un $\gamma_s = 1.19$.

Si se considera un coeficiente $\gamma_f = 1.35$, equivalente a los coeficientes de seguridad introducidos en la mayoración de las cargas, se puede obtener una tensión actuante aproximada, para el estado tensional del 1^{er} Estado Límite de: $q_{1EI} = 282.66 \text{ kN/m}^2$.

Conclusiones.

Como resultado de todo lo expuesto anteriormente, se pueden arribar a las siguientes conclusiones:

- ☞ Con la restricción del comportamiento del suelo a un estado lineal, en el 2^{do} Estado Límite de diseño se reducen mucho las capacidades resistentes reales de los suelos friccionales.
- ☞ El cálculo de asentamientos por métodos no lineales, es una solución acertada para resolver la problemática de los suelos friccionales; y el análisis realizado permitió verificar que con el mismo se obtienen resultados acertados y muy aproximados a los reales, que implican soluciones ingenieriles más eficientes, que con métodos lineales.
- ☞ La aplicación del cálculo de asentamientos por métodos no lineales, brinda soluciones de diseño muy racionales y seguras, que permite el ahorro de grandes volúmenes de materiales y la disminución de los costos de construcción de las cimentaciones.

Bibliografía

1. González - Cueto, A. V., Quevedo, G. "Informe técnico final del proyecto CITMA 140102; UCLV-- (Const); 1998.
2. González - Cueto, A. V., Quevedo, G. "Análisis y solución de cimentaciones en zonas de playa." Memorias de la Conferencia Internacional de Construcciones para el Turismo. La Habana. 1999.
3. Maestre, M. A.; Fernández, O. "Caracterización geotécnica de las arenas calcáreas. Modelaje. Diseño geotécnico de cimentaciones." ENIA Matanzas, 1997.
4. Maestre, M. A.; Fernandez, O. "Evaluación de las características geotécnicas de las arenas mediante ensayos "in situ" y su utilización en el diseño de las cimentaciones" ENIA Nacional, – 45 pág. 1994.

5. Malishev, M. V; Nikitina, N.S. Cálculo de asentamientos de cimentaciones para condiciones no lineales entre las tensiones y las deformaciones del suelo._Revista Trabajos N.I. Bases y Construcciones Subterráneas. (Moscú) N (2): 21-25; 1982.
6. Maugeri, M.; Catelli, F.; Massimino, M.; Verona, G. "Observed and computed settlements of two shallow foundations on sand" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 595 – 605, Julio 1995.
7. Quevedo Sotolongo, G. "Determinación del área de la base de cimentaciones superficiales: Método de cálculo." UCLV. (Const); 87 pág. 1989.