

Artículo: Algunas recomendaciones para la modelación por elementos finitos de las cimentaciones sobre pilotes.

Autor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora.

Departamento de Ing. Civil. Facultad de Construcciones. UCLV. Cuba.

Año: 2004

Palabras claves: Cimentación, Pilotes, Modelación.

Foundation, Piles, modelling.

Resumen:

En el presente trabajo se abordan algunas recomendaciones prácticas para la utilización de programas con base en el Método de los Elementos Finitos (MEF) que frecuentemente se utilizan para la modelación de problemas tensión deformación, deformaciones plásticas y fallas en cimentaciones sobre pilotes, que en muchos casos se obvian arrojando resultados alejados de la realidad. Para ello se exponen criterios de gran uso en la bibliografía internacional y las experiencias del autor en su aplicación para el caso de cimentaciones sobre pilotes. Se ejemplifica a través de comparaciones los resultados obtenidos a través de la modelación con otras formulaciones, comprobándose la validez del modelo propuesto.

Summary:

Presently work some practical recommendations are approached for the use of programs with base in the Method of the Finite Elements (MEF) that frequently are used for the modeling of problems tension deformation, plastic deformations and fail in deep foundations that are obviated throwing results far from the reality in many cases. For they are exposed it approaches of great use in the international bibliography and the author's experiences in their application for the case of piles. It is exemplified through comparisons the results obtained through the modeling with other formulations being proven validates it of the proposed pattern.

Índice

Introducción.....	2
Desarrollo.....	3
Recomendaciones prácticas para la modelación.....	5
Descripción del modelo propuesto para la modelación del pilote aislado.....	7
Comprobación del modelo propuesto.....	9
Conclusiones.....	10
Bibliografía.....	10

Introducción:

Antes de adentrarnos en el tema de la modelación deberíamos definir su concepto, que no es más que *“simplificar o reducir el medio real a uno físico en el cual sea posible aplicar las ecuaciones constitutivas que gobiernan el problema. Se define como relaciones constitutivas las expresiones matemáticas de las leyes físicas que gobiernan el problema que se estudia”* [Jiménez(1986)]. La modelación es el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el cual, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto” modelado y está en condiciones de sustituir el “objeto” que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener determinada información susceptible de comprobaciones experimentales.

A la hora de enfrentar cualquier problema ingenieril innumerables son las formas de resolverlos y en muchos casos el modelo propuesto solo puede ser soluble con la aplicación de potentes programas de computación con base en diferentes Métodos Numéricos. Diferentes autores coinciden que los procedimientos a la hora de resolver un problema [Sowers (1977)] deben seguir la siguiente secuencia:

- 1- Identificar el problema en su totalidad y después simplificarlo, dividiéndolo en partes y fijando factores significativos.
- 2- Utilizar las teorías apropiadas con las tolerancias permitidas, impuestas por sus limitaciones.

- 3- Utilizar modelos físicos o matemáticos cuando se compruebe que las teorías son inadecuadas.
- 4- Los resultados de los estudios teóricos y con medios deben ser interpretadas a la luz de la experiencia.
- 5- Las lagunas en el conocimiento del problema deben llenarse intuitivamente.
- 6- Las soluciones deben ser reevaluadas y revisadas cuando la observación del funcionamiento real de la obra demuestre que son inadecuadas.

Desarrollo

Si se conoce el comportamiento elemental del material de nuestro dominio, necesitamos procedimientos para extender tal comportamiento a todo el problema y resolver para las condiciones de contorno impuestas. Existen varias alternativas para dar este paso, cada una constituye un método (Analítico, Empíricos y Numéricos). Los métodos numéricos son aquellos en los que la solución analítica es inabordable por la complejidad matemática que requiere y que hoy en día con la ayuda del cálculo electrónico se tiene una respuesta rápida. Dentro de estos métodos podemos citar el Método de las Diferencias Finitas y el Método de los Elementos Finitos. En el primero de ellos es preciso, como paso previo, la formulación de la ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el problema. El principio fundamental del método estriba en sustituir la expresión diferencial por una expresión equivalente en términos de incrementos finitos de las variables. Todas las variables del problema quedan discretizadas. La discretización de las variables geométricas conduce a una subdivisión del dominio mediante una red ortogonal. La discretización de las ecuaciones diferenciales permite obtener expresiones que relacionan los valores de las variables y sus incrementos y por tanto permiten la solución en forma incremental [Jiménez(1984)].

Hay muchas formas de desarrollar el Método de los Elementos Finitos, como un método específico dentro del cálculo variacional, como un caso particular del método de RITZ-GALERKIN, como una extensión del método de diferencias finitas, como una aplicación del cálculo matricial de estructuras, etc. Por este método se divide la masa de suelo en distintos elementos en los que la reacción a la carga de cada uno es equivalente a la porción del suelo que él representa. Las deformaciones correspondientes a cada elemento son compatibles con las del elemento contiguo, porque están unidos por los puntos

nodales. La reacción total de la masa se reduce a un sistema de ecuaciones simultáneas que satisfaga el equilibrio y compatibilidad para cada elemento. Su aplicación esta en los modelos de distribución de esfuerzos en terraplenes que se apoyan en suelos elásticos, simulación de construcción por capas, en la reacción de un talud de tierra o roca o la aceleración horizontal de un terremoto. También puede ser usado en el período de transición entre el comportamiento elástico y plástico del material, empleando técnicas espaciales si no hay una relación única entre esfuerzo y deformación.

En la bibliografía consultada RANDOLPH(1994), ABALO (1975), ZEQUEIRA, entre otros acuden a la utilización del Método de los Elementos Finitos y el comportamiento no lineal del suelo [Jiménez(1984)] para la solución de problemas tensión deformación en diferentes obras geotécnicas y en el análisis del comportamiento de pilotes bajo el efecto de carga horizontal. Como tendencia mundial se aprecia la utilización de elementos de deslizantes o interface para modelar la interacción entre la cara del pilote y el suelo. Los parámetros que caracterizan estos modelos suelen ser muy variables en función del tipo de obra y problema a resolver. Para el caso de macizos rocosos RIVERO (1984) y SORIANO(1994) acuden a la fricción en la falla, mientras que para la interface suelo – acero o suelo–hormigón se recurre a valores empíricos que oscilan entre $\frac{1}{2}$ o $\frac{2}{3}$ de los valores $(c \text{ y } \phi)$ obtenidos en el ensayo triaxial.

En la modelación del comportamiento real del suelo, las propiedades del mismo son obtenidas de ensayos que en lo posible tratan de reproducir el comportamiento del suelo en el estado de carga de la estructura real que se pretende estudiar. El resultado de estos ensayos muestra que el comportamiento del suelo es no lineal, dependiendo en gran medida de la presión de confinamiento que se tenga. De aquí la aplicación de modelos de comportamiento no lineal según KONDNER (1963), DUNCAN y BRAU 1997 cuyo uso viene unido a la aplicación del MEF.

Recomendaciones prácticas para la modelación.

Una malla de elementos finitos para la solución de nuestro problema debe tener en cuenta lo esencial de la geometría de la estructura y las capas de suelo que se ponen en contacto para la solución del problema (heterogeneidad de los materiales, presencia de discontinuidad). Pero la malla debe ser en sí, el fruto de un compromiso entre la capacidad de cálculo posible (numero máximo de grados de libertad) y la precisión aceptable sobre los resultados numéricos. La malla utilizada debe ser construida considerando los siguientes puntos.

- 1 Todas las simetrías compatibles con el problema mecánico (geometría, condiciones límites, cargas) deben ser utilizadas a fin de reducir el tamaño del sistema estudiado.
- 2 La malla debe ser suficientemente fina en las zonas más solicitadas, quiere decir, en las zonas donde existan grandes variaciones de los desplazamientos y las tensiones. Estas variaciones son coaccionadas ya sea por una carga, o por la presencia de una singularidad geométrica (ángulo brusco, cambio de espesor), por los contornos geométricos de fuerte curvatura (cavidades), o también por las características mecánicas localmente muy leves o muy fuertes en correspondencia a este medio ambiente [Mesat (1993)].
- 3 El tamaño de los elementos debe estar, en la medida de lo posible de tal forma que la relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión este cercana a la unidad. En particular, en las zonas de fuertes gradientes, los triángulos tendrán similitud, en lo posible, a los triángulos equiláteros, los cuadriláteros a los cuadrados, y los hexaedros a los cúbicos, para no introducir perturbaciones en los cálculos numéricos (distorsión de los elementos).
- 4 En las zonas menos solicitadas, los elementos de gran tamaño son generalmente colocados en el lugar para alcanzar las fronteras exteriores. No hay reglas precisas para establecer el tamaño de los elementos, es suficiente argumentar un aumento progresivo regular lejos de las zonas sensibles.

Para los problemas bidimensionales las mallas cuadradas pueden ser fácilmente utilizadas, en el mismo grado de la singularidad. En cambio, para los problemas tridimensionales las mallas refinadas son difíciles de realizar, pues el tamaño de los sistemas matriciales pueden pasar más allá de las capacidades de las computadoras actuales (en caso de los cálculos no lineales complejos). En consecuencia con la modelación, es frecuente la utilización en el caso de problemas tridimensionales soluciones bidimensionales.

Caso de pilote aislado en un suelo masivo

Modelo de pilotes en deformación axialsimétrica:

La malla de un pilote aislado, situado en un suelo homogéneo semi-infinito debe ser realizada teniendo en cuenta las recomendaciones siguientes:

- 1 Los límites verticales de la malla deben ser fijados al menos dos veces la altura o el largo (L) del pilote y el límite vertical inferior al menos dos veces el lado L debajo del punto ($3L$ desde la superficie), porque las condiciones límites de los desplazamientos no influyen sobre el comportamiento del pilote.

- 2 La interacción entre el pilote y el suelo (cara y el punto) son representados por los elementos finitos de interacción compatibles con los elementos más utilizados para describir el suelo (Elementos de interfase).
- 3 La malla de un pilote aislado debe ser relativamente estrecha cuando se acerca a las interacciones, quiere decir, a la punta del pilote y a lo largo de la cara del mismo.
- 4 La relación entre la forma (relación de la menor dimensión de un elemento con la mayor dimensión) de los elementos cerca del pilote deberá estar limitado a 1/5.
- 5 El lado B (según la dirección horizontal) del primer elemento directamente adyacente al pilote debe ser al menos tal que $B=0.1D$ donde D es el diámetro del pilote. En la figura 1 se puede apreciar lo anterior expuesto.

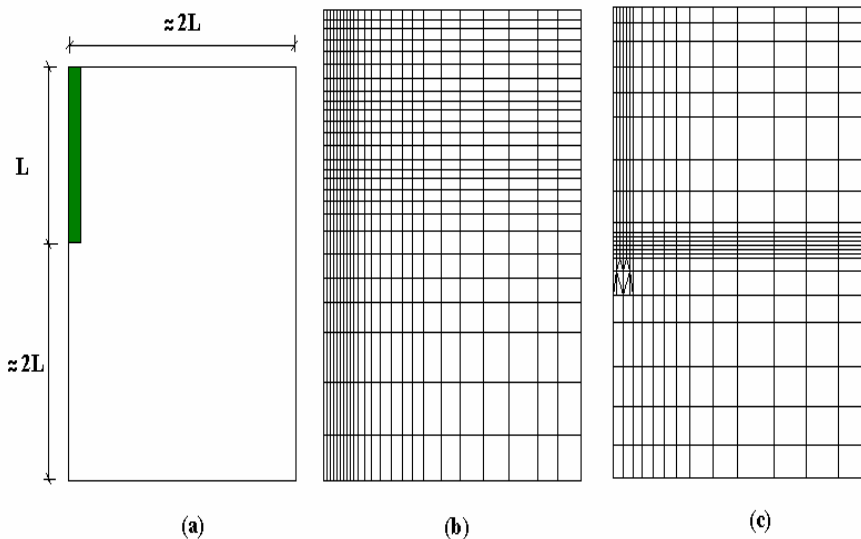


Figura 1. Representación del modelo axial - simétrico para el caso del pilote simple.

Caso de grupo de pilotes:

La modelación de un grupo de pilotes es un problema muy complejo a causa de múltiples interacciones y de la geometría tridimensional que se hace en la mayoría de los casos considerados. Tres posibilidades se recomiendan [Mesat(1993)] pueden ser posibles según el tipo de estudio:

- 1- Una modelación verdaderamente tridimensional para un grupo de pilotes con cabezal o sin él, y con posibilidades de aprovechar bien la simetría aparente.

Sin embargo, el número elevado de pilotes a veces lleva imposibilitada la elaboración de un elemento con los pilotes de sección circular o el mismo ortogonal. Para realizar una modelación razonable, hay que asimilar los pilotes reales a los pilotes de sección cuadrada. En los pilotes que estén bajo la carga vertical o un poco inclinados; en las comparaciones

con los cálculos axial - simétricos los resultados del desplazamiento son relativamente poco afectados. En cambio por las cargas laterales, esta aproximación puede conducir a errores no permisibles.

- 2- Una modelación local bidimensional por un grupo de pilotes sin cabezal. El modelo es un corte transversal en deformación plana, donde cada fila de pilote tiene su propio comportamiento. Esto a veces es posible según el tipo de carga y la naturaleza de la capa de suelo de reducir el estudio del grupo considerando dos tipos de filas: una fila con pilotes exteriores al grupo y una fila con pilotes interiores al grupo. La utilización de la simetría y de las condiciones límites del desplazamiento permanente es posible teniendo en cuenta el desplazamiento entre las filas de pilotes.
- 3- Una modelación bidimensional equivalente a un corte vertical comprendidos los pilotes, el cabezal y la estructura. Los pilotes son colocados más cerca para que representen un muro enterrado de rigidez equivalente. Esta aproximación no es verdadera, muy particular y no es aconsejable.

Si bien las equivalencias bidimensionales muestran muchas aproximaciones y presentan muchas limitaciones (notablemente en lo que concierne a los movimientos del suelo en el seno del grupo de pilotes), ellas son también frecuentemente utilizadas, pues conducen a los modelos numéricos menos importantes en términos de números de nodos y de elementos.

Descripción del modelo propuesto para la modelación del pilote aislado.

A continuación se procede a la modelación de un pilote aislado siguiendo las recomendaciones anteriormente expuestas, utilizando el sistema SIGMA/W(1995). Como la discretización del continuo siempre trae consigo una aproximación a la solución del problema, se proponen 5 modelos iniciales: MODELO 1, MODELO 2, MODELO 3, MODELO 4 Y MODELO 5. El objetivo principal es determinar aquel modelo con que mayor precisión se obtenga de carga de rotura. La diferencia entre los modelos está dada por la cantidad de los elementos verticales y horizontales utilizados y el espesor de los elementos adyacentes a la cara del pilote.

Modelo	Divisiones	Divisiones	Superficie	Cantidad
--------	------------	------------	------------	----------

	Verticales	horizontales	Deslizamiento	Elementos
MODELO1	38	80	0.4·D	3040
MODELO 2	40	100	0.2·D	4000
MODELO 3	45	100	0.1·D	4500
MODELO 4	50	120	0.1·D	6000
MODELO 5	60	120	0.1·D	7200

Tabla 2. Modelos planteados con el sistema SIGAMA/W(1995).

Las características físico mecánicas para el suelo estudiado son:

Densidad : 18.5 kN/m³

Ángulo de fricción interna : 25°

Ángulo de dilatación : 0

Cohesión : 0 kPa

Tensión de tracción : 0

Se considera un pilote de hormigón de 10 metros de longitud y un diámetro de 0.8 metros.

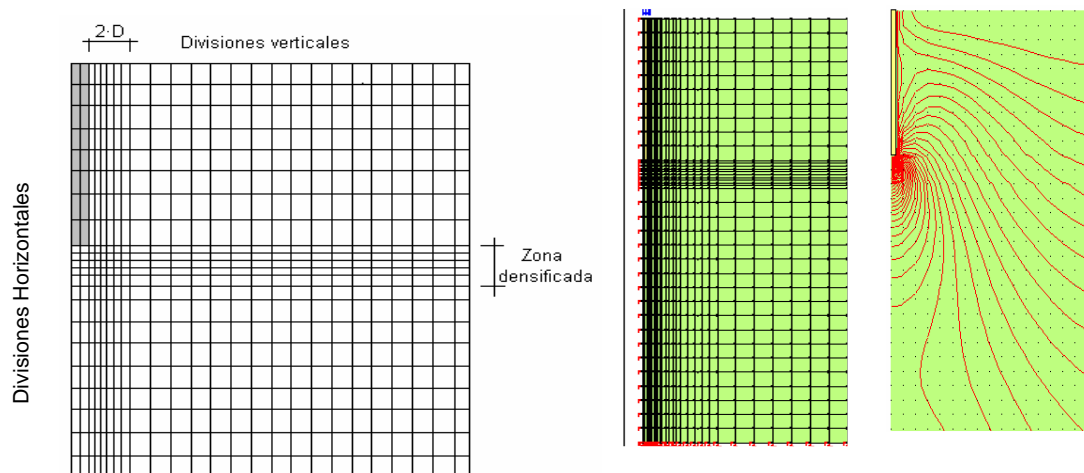


Figura 2. Mallado para el modelo propuesto. Programa SIGMA/W (1995).

En la tabla 3 se muestra la carga última obtenida en cada modelo, con el sistema SIGMA/W, teniendo en cuenta los datos anteriormente expuestos:

MODELO	Carga última (kN)
MODELO 1	8458
MODELO 2	5495
MODELO 3	2700
MODELO 4	2560
MODELO 5	2500

Tabla 3. Carga de rotura.

Como se aprecia, en la medida en que aumenta el número de elementos verticales, se obtiene resultados más precisos. Este hecho viene dado fundamentalmente por el espesor que se le asigne al elemento adyacente a la cara del pilote, elemento de interface, el cual como ya se mencionó tendrá propiedades específicas. Se decide la utilización del

MODELO 5 ya que como se aprecia la diferencia con el resultado obtenido en el MODELO 4 es menor de un 3% y continuar aumentando el número de elementos en la modelación requería un mayor esfuerzo computacional sin grandes variaciones en el resultado final.

Comprobación del modelo propuesto.

Con el objetivo de demostrar la validez del modelo propuesto se realizan varios ejemplos para el caso de un pilote de 10 metros apoyado en un suelo friccional (ϕ) y en un suelo cohesivo (C). En estos casos se evalúa la influencia de estos factores en la capacidad de carga de la cimentación y el grado de aproximación entre los resultados obtenidos. El principal resultado de los modelos lo constituye la carga vertical resultante sobre el pilote (N_p), a partir de la cual se calcula la capacidad de carga.

Los datos utilizados fueron los siguientes:

- Pilote: Modelo elástico
- Material: Hormigón.
- Longitud: 10 metros.
- Terreno: Modelo elásto – plástico, criterio de rotura Morh – Coulomb.
- Factor de reducción en la interfase $R=2/3$ (Arena) y $1/2$ (Arcillas).

A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando el modelo propuesto con el sistema SIGMA/W y otras normativas:

Carga de Rotura (kN)				
ϕ°	Norma Cubana	Berezantev	Caquot Kerisel	Modelo Propuesto
25°	1594	1867	4564	2500
30°	3388	2891	8419	4100
35°	9030	7757	16217	10250
40°	10128	14711	33207	21034

Tabla 4. Carga de rotura por diferentes normativas, suelo friccional, D = 0.8 metros.

Carga de Rotura (kN)

Cohesión	Reese (1984)	Caquot Kerisel	Modelo Propuesto
40 kPa	1045	1238	1067
80 kPa	1427	2384	1481
120 kPa	1568	3530	1918

Tabla 5. Carga de rotura por diferentes normativas, suelos cohesivos, D = 0.8 metros

Los resultados obtenidos por el modelo propuesto se encuentran en el rango de las normativas analizadas, lo que nos indica la validez del modelo estudiado y su posterior aplicación. Para los suelos friccionales la Propuesta de Norma Cubana (1989) limita el valor de Z_c entre $3 \cdot D$ y $22 \cdot D$, además de utilizar bajos valores del coeficiente de capacidad de carga N_q que influyen en los resultados finales. Todo lo contrario ocurre con los resultados obtenidos por Caquot-Kerisel (1964), donde se emplean altos coeficientes de capacidad de carga (N_q). En suelos cohesivos la diferencia entre los resultados está dada por el coeficiente de adherencia utilizado (α) por las diferentes formulaciones.

Conclusiones:

La modelación de las obras geotécnicas por los Métodos de los Elementos Finitos se ha hecho posible por un grupo de hipótesis basadas en la geometría de las obras, de su entorno, los materiales y su comportamiento, las cargas, las condiciones límites y las condiciones iniciales. Estas hipótesis, muchas veces simplificadas (pero que deben respetar los fenómenos mecánicos esenciales) han quedado bajo la responsabilidad del ingeniero encargado del estudio.

Por otra parte los resultados obtenidos a través de la modelación demuestran la posibilidad de la utilización de los métodos numéricos para la modelación de las cimentaciones sobre pilotes y la validez de las recomendaciones prácticas abordadas en el trabajo.

Bibliografía:

1. Abalo Marcias, Miguel: Teoría y aplicaciones del método de los elementos finitos en la ingeniería geotécnica. /. Miguel Abalo Marcias. Revista Ingeniería Civil 4-79. pág 281-297.
2. Caquot, A and Kerisel, J.: Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en Castellanos. Gaunthier-Villars,1964. Paris, France.

3. Duncan, J.M.: Nonlinear Analysis of stress and strain in soils. / J.M. Duncan y C.Y. Chang. Proceeding, ASCE JSM and F.Dn. Vol 96. 1970. pág 1629-1653.
4. GeoSlope: SIGMA/W. For finite element analysis. User's guide. Geoslope International Ltd. 1995. Calgary, Alberta, Canadá.
5. Horta, Evelio: Algunos hechos en la utilización del método de los elementos finitos en Cuba. / Evelio Horta. Revista Ingeniería Civil 6-75. pág 555-563.
6. Jimenez Salas, J. A.: Geotecnia y cimientos. / Jose Antonio Jimenez Salas. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III. 1986.
7. Kondner, R.L.: Hyperbolic Stress-Strain response cohesive soils. / R.L. Kondner. Proceeding ASCE, JSM and F. Dn. Vol 89. SM-1. 1963, pág 115-143.
8. Mestat Philippe.: Combinaciones de elementos finitos para las obras geotecnicas. Consejos y recomendaciones. Philippe Mestat./ Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 212 (Julio- Agosto) 1993. 39-64 pág
9. Ministerio de Educación. Anteproyecto de norma cubana: Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. Ministerio de Educación. Cuba. 1989. Editorial Pueblo y Educación, 50 p.
10. Randolph, M.F: Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles. / M.F. Randolph and Wroth. Revista Geotechnique. Vol 31. No 1 pág 143-157.
11. Reese , L.C.: Handbook on Design of piles and Drilled Shafts Under Lateral Loads. US Department of Transp. 1984, Washington, DC, USA.
12. Soriano, A.: Numerical analysis of the behaviour of piles on soft rocks. / Antonio Soriano y Carlos Oteo. Proc. Int. Symp on Numerical Models in Geomech. Zurich. 1982.
13. Sowers, George B.: Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. / George B. Sowers y George F. Sowers. La Habana. Editorial Pueblo y Educación. 1977. 677 pág.