



# Universidad Austral de Chile

Facultad de ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

## RECUPERACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS Y COMPUTACIONALES EN INGENIERÍA DE FUNDACIONES “ESFUERZOS EN PILOTES”

Tesis para optar al título de:  
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:  
Sr. Luís Collarte Concha.  
Ingeniero Civil. M. Sc. en Ingeniería Civil.  
Especialidad Hidráulica Mecánica de Suelos.

ANIBAL DANIEL MEZA PEREZ

VALDIVIA – CHILE

2007

*A mis Padres, pilares fundamentales de mi vida....*

*A mi hermano Alfonso, apoyo incondicional para el logro de mis metas...*

*Y a toda mi familia, por su entrega y dedicación.*

## INDICE TEMATICO

		<b>Pág.</b>
<b>CAPITULO I:</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodología	4
<b>CAPITULO II:</b>	<b>ASPECTOS TEORICOS</b>	<b>5</b>
2.1	Cimentaciones Profundas	6
2.1.1	Pilotes	6
2.1.2	Uso de los Pilotes	7
2.1.3	Instalación de Pilotes	8
2.1.4	Comportamiento del Pilote durante la Hinca	9
2.1.5	Efectos del Pilote en el Suelo	9
2.1.6	Capacidad de Carga de los Pilotes	11
2.1.6.1	Análisis Estático	11
2.1.6.2	Análisis Dinámico	14
2.1.7	Cargas Laterales	15
2.2	Método de los Elementos Finitos	17
2.3	FORTRAN	18
2.4	MATHCAD13	19
2.4.1	Características Principales	20
2.4.2	Áreas de Aplicación	20
<b>CAPITULO III:</b>	<b>ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS PROGRAMAS EN FORTRAN IV</b>	<b>21</b>
3.1	Programación en FORTRAN IV	22
3.1.1	Identificación de las Variables	22
3.1.2	Lectura de las Variables	22
3.1.3	Clasificación de los Parámetros	23
3.1.4	Generación de Parámetros de Cálculo	24

3.1.5	Obtención de Resultados	25
3.2	Problemas de Ejecución	26
3.3	Criterio de Programación	28
 <b>CAPITULO IV: PROGRAMACION</b>		 29
4.1	Estudio y Análisis de la Programación	30
4.1.1	Lateral Piles	30
4.1.1.1	Introducción al Problema	30
4.1.1.2	Estimación del Módulo de Reacción Horizontal del Suelo, kh	31
4.1.1.3	Método de Análisis, Matriz de Rigidez	34
4.1.1.4	Matriz Global de Rigidez para un Elemento Dividido en N nodos.	35
4.1.1.5	Análisis de Esfuerzos	39
4.1.2	Static Piles	41
4.1.2.1	Estimación de la Capacidad de Soporte Por Punta	42
4.1.2.2	Estimación de la Capacidad de Soporte Por Fricción Lateral	44
4.2	Programación Final en Detalle	47
4.2.1	LATERAL PILES	47
4.2.2	STATIC PILES	53
 <b>CAPITULO V: ANALISIS DE RESULTADOS</b>		 61
5.1	Comprobación de los Resultados	62
5.1.1	LATERAL PILES	62
5.1.1.1	Problema 1	62
5.1.1.2	Problema 1 aplicado a LATERAL PILES	64
5.1.1.3	Problema 2	66
5.1.1.4	Problema 2 aplicado a LATERAL PILES	70
5.1.2	STATIC PILES	74
5.1.2.1	Problema 1	74
5.1.2.2	Problema 1 aplicado a STATIC PILES	77

<b>CAPITULO VI:</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
6.1.-	Conclusiones	81
6.2.-	Características de uso y recomendaciones para los programas	82
6.2.1.-	LATERAL PILES	82
6.2.2.-	STATIC PILES	83
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>85</b>
<b>ANEXOS</b>		
ANEXO A	Programas originales en FORTRAN IV	87
ANEXO B	Matriz de Rigidez Global del Sistema	100
ANEXO C	Test de Penetración Standard	102
ANEXO D	Programas Finales	104
	LATERAL PILES	105
	STATIC PILES	107
ANEXO E	Diagramas de flujo de programación	109
	LATERAL PILES	110
	STATIC PILES	111

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Distribución de esfuerzos y reacciones entre un pilote sometido a carga lateral, y el suelo	33
Figura 2.1: División de un pilote en subelementos. Estado de Reacciones	34
Figura 2.2: Elemento base de diseño	35
Figura 3: Elemento 1 de la subdivisión de un pilote	36
Figura 4: Elemento 2 de la subdivisión de un pilote	36
Figura 5: Elemento 3 de la subdivisión de un pilote	37
Figura 6: Elemento 4 de la subdivisión de un pilote	37
Figura 7: Elemento particionado en 4 subelementos	39
Figura 8: Pilote solicitado por una carga axial estática	41
Figura 9: Elemento de un pilote para la determinación de la capacidad De soporte por fricción lateral	44
Figura 10: Distribución de esfuerzos y desplazamientos de un pilote Cargado lateralmente	52
Figura 11: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente (Problema 1)	63
Figura 12: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente (Programa)	65
Figura 13: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente (Problema 2)	66
Figura 13: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente (Programa)	73
Tabla 1: Factores de Capacidad $N_c$ , $N_q$ y $N_\gamma$ , para un pilote solicitado lateralmente	32
Tabla 2: Factor de Capacidad $N_c^*$ dado por Vesic para la estimación de La capacidad de soporte por punta de un pilote	43
Tabla 3: Factor de Capacidad $N_q^*$ dado por Vesic para la estimación de La capacidad de soporte por punta de un pilote	43
Tabla 4: Factores de Capacidad de resistencia dados por Terzagui y Vesic. (LATERAL PILES).	49
Tabla 5: Factores de Capacidad de resistencia dados por Vesic (STATIC PILES).	55

Tabla 6: Valores entregados por el estudio de mecánica de suelos realizada al ex – Hotel Pedro de Valdivia para el emplazamiento del nuevo casino.	74
Tabla 7: Cálculo de la capacidad total de soporte de un pilote realizado por el profesor guía.	75
Tabla 8: Interpolación realizada para encontrar los valores exactos correspondientes a la profundidad de 13,4 m	76
Tabla 9: Tabla comparativa de los valores finales de la capacidad de soporte total de un pilote.	79

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza la programación en MATHCAD13 del diseño y verificación de esfuerzos de pilotes para dos tipos de casos; el primero para un pilote con una carga solicitante lateral, aplicada en su cabeza superior, la cual puede ser tomada como una carga sísmica, y el segundo caso, para un pilote con carga axial estática, solicitación proveniente de una estructura.

Para ello se analizaron y estudiaron metodologías aplicadas en programas antiguos, creados en FORTRAN IV, los cuales debido a su extensa metodología de programación, se reprogramaron en un software mas actual.

Los datos y resultados obtenidos en los programas, fueron revisados y comparados con problemas propuestos de pilotes para ambos casos.

## **SUMMARY**

This project presents two computer programs designed with the software MATHCAD13. These programs design and verify piles stress applied for two kinds of cases. The first one, was designed for a pile with a lateral loading. It was applied in the head of the pile. Which can be taken as a earthquake stress. The second one, was designed for a pile with a static loading which was originated in the main structure.

In this way were studied and analyzed two applicable methodologies with old programs created in FORTRAN IV.

The data and results obtained in the programs were reviewed and compared using real examples of piles for both cases.

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO**

## 1.1.- INTRODUCCION

En Ingeniería de Fundaciones, existen diferentes soluciones ante problemas que surgen del diseño y cálculo de estructuras, en donde se debe asegurar un sistema de fundación adecuado y funcional que sea capaz de responder ante las solicitaciones internas y externas a las cuales será sometida una estructura o elemento dado.

Una de las soluciones frente a determinados tipos de suelos son las cimentaciones profundas, en donde uno de los principales elementos son los Pilotes, los cuales deben ser previamente diseñados, confeccionados y ensayados antes de su utilización final en un sistema de fundación.

Existen diversos métodos de cálculo de esfuerzos y reacciones para un pilote, los que han sido usados durante años, así como también, existen programas computacionales que se encargan de diseñar pilotes, utilizando, métodos de cálculo como el de elementos finitos, mecánica de suelos y teoría sobre fundaciones.

Existen programas creados en software de lenguajes antiguos de programación, como los creados por Bowles (1974) que son la base de programas actuales utilizados por ingenieros para el cálculo y diseño de fundaciones, y cuya programación ocupa metodología de análisis estructural y cálculo matricial.

Este trabajo de tesis consta en recuperar métodos analíticos y computacionales en ingeniería de fundaciones, basándose en dos programas que calculan esfuerzos y reacciones en pilotes con distintas solicitaciones, creados en FORTRAN IV por Joseph Bowles en el año 1974 en su libro "Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering".

Las metodologías recuperadas se programaran en el software de diseño ingenieril MATHCAD13, en el cuál se analizaran dos casos de diseño de pilotes; en el primero, se modelara el pilote como un elemento tipo barra con dos grados de libertad por nudo (traslación y rotación), y apoyado resortes que representan las características del suelo, solicitado con una carga lateral aplicada en la cabeza del pilote; el segundo, tomando el modelo clásico dado por autores tales como Vesic o Meyerhoff, para la determinación de la Capacidad de Resistencia Ultima de un pilote introducido en un suelo de distintas estratigrafías.

## 1.2.- OBJETIVOS

### Objetivo general:

- Recuperar dos programas de metodología Analítica y computacional en Ingeniería de Fundaciones, escritos en FORTRAN IV, que calculan los esfuerzos y reacciones en pilotes.

### Objetivos específicos:

- Estudiar y revisar los procedimientos empleados, revisar la teoría aplicada, así como también, los métodos de cálculo utilizados en la programación.
- Revisar el lenguaje de programación en un software adecuado, realizando las correcciones necesarias para el funcionamiento de los programas.
- Compilar y ejecutar los programas, realizando las correcciones necesarias para su funcionamiento.
- En el caso de no hacer funcionar uno o los dos programas elegidos, programar en un software de Ingeniería adecuado, la metodología empleada en los programas originales.
- Analizar y verificar diferentes problemas de pilotes, revisando los resultados entregados con métodos aproximados en ingeniería de fundaciones.

### **1.3.- METODOLOGÍA**

Se comenzará con una fase de análisis exploratorio al texto que contiene la escritura de programación, en la cual se estudiarán y elegirán los programas que serán recuperados, para luego buscar apoyo de la literatura existente en relación al tema de este proyecto, en donde se extraerá y recopilará el material que sea necesario para la realización de éste.

A continuación se realizará un estudio del lenguaje ocupado y un análisis de la metodología empleada en los programas, corroborando las fórmulas empleadas, así como también los métodos de cálculo aplicados para el funcionamiento del programa.

Luego se procederá a la escritura de los programas, en un software adecuado de lenguaje similar, el cual permitirá compilar, realizar las correcciones necesarias y ejecutar los programas.

En el caso de no poder ejecutar y recuperar los programas, se extraerá la metodología y procedimientos aplicados en el texto original, apoyándose en otros textos, materia de asignaturas correspondientes y en el profesor guía, para reprogramarlos en un software más actual de mejores características y propiedades.

Una vez ejecutados los programas, se rectificaran sus resultados con problemas vistos en Fundaciones, para realizar un análisis comparativo y así finalmente, poder validar su funcionamiento.

Los programas recuperados, o los programas creados, en el caso de reprogramarlos, serán entregados al Instituto de Obras civiles de la universidad austral de Chile, quedando a disposición de académicos y estudiantes de las carreras de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería Civil en Obras Civiles.

# **CAPITULO II**

## **ASPECTOS TEORICOS**

## **2.1. - CIMENTACIONES PROFUNDAS**

El cimiento es aquella parte de la estructura encargada de transmitir las cargas al terreno. Las cimentaciones de la mayor parte de las estructuras se encuentran debajo de la superficie del terreno.

Cuando el suelo situado al nivel en que se desplantaría normalmente una zapata o una losa de fundación, es demasiado débil o compresible para proporcionar un soporte adecuado, las cargas se deben transmitir a un material mas adecuado a mayor profundidad lo que se denomina como “cimentación profunda”. (Terzagui, 1973).

Las cimentaciones profundas se emplean cuando los estratos de suelo o de roca situados inmediatamente debajo de la estructura no son capaces de soportar la carga, con la adecuada seguridad o con un asentamiento tolerable. Como la cimentación superficial, también la cimentación profunda, incluyendo los estratos de suelo o roca situados debajo, deben ofrecer seguridad y no asentarse excesivamente por efecto de las cargas de la estructura que soportan. (Terzagui, 1973).

Existen dos tipos de cimentaciones profundas generalmente aceptadas: pilotes y pilares.

En este proyecto nos evocaremos únicamente al uso de pilotes.

### **2.1.1.- PILOTES**

Los pilotes son fustes relativamente largos y esbeltos que se introducen en el terreno. Son miembros estructurales con un área de sección transversal pequeña, comparada con su longitud, y usualmente se instalan usando una piloteadora que tiene un martinete o un vibrador. A menudo se hincan en grupos o en filas, conteniendo cada uno suficientes pilotes para soportar la carga de una sola columna o muro.

Según Bolognesi (2002) las columnas con poca carga, pueden en algunos casos, necesitar un solo pilote. Sin embargo, ya que en las condiciones del trabajo de campo, la posición real de un pilote puede quedar a varios centímetros de la posición proyectada, difícilmente pueden evitarse las cargas excéntricas. En consecuencia las cabezas de los pilotes aislados usualmente se arriostran en dos direcciones por medio de contratrabes.

Si solo se necesitan dos pilotes las cabezas se unen con un cabezal de hormigón, siendo arriostradas solamente en una dirección, perpendicular a la línea que une los dos pilotes. Los grupos que contienen tres o más pilotes, están provistos de cabezales de hormigón reforzado y se consideran estables sin apoyarlos con contratrabes. (Bolognesi, 2002).

### **2.1.2.- USO DE LOS PILOTES**

Los pilotes se usan de muchas maneras. Los pilotes de carga que soportan las cimentaciones son los más comunes. Estos pilotes transmiten la carga de la estructura a través de estratos blandos a suelos más fuertes e incompresibles o a la roca que se encuentre debajo, o distribuyen la carga a través de los estratos blandos que no son capaces de resistir la concentración de la carga de un cimiento poco profundo.

Los pilotes de carga se usan cuando hay peligro de que los estratos superiores del suelo puedan ser socavados por la acción de las corrientes o las olas, o en los muelles y puentes que se construyen en el agua. (Pilotaje, 2003).

Según Bowles (1996) los pilotes de tracción se usan para resistir fuerzas hacia arriba, como en las estructuras sometidas a supresión; tales son los edificios cuyos basamentos están situados por debajo del nivel freático, las obras de protección de presas o los tanques sorterrados. También se emplean para resistir el vuelco en muros y presas, y como anclaje de los cables que sirven de contravientos en las torres o retenidas en los muros anclados y en las torres.

Los pilotes cargados lateralmente soportan las cargas aplicadas perpendicularmente al eje del pilote y se usan en cimentaciones sometidas a fuerzas horizontales, como son los muros de sostenimiento de tierras, los puentes, las presas y los muelles, y como defensas y duques de alba en las obras de los puertos.

Si las cargas laterales aplicadas en la cabeza superior del pilote son grandes, los pilotes inclinados pueden resistirlas más eficazmente. Estos son pilotes que se hincan con un cierto ángulo y frecuentemente se usa una combinación de pilotes verticales e inclinados. (Gunaratne, 2006).

Los pilotes se usan algunas veces para compactar el suelo o como drenes verticales en estratos de baja permeabilidad. Los pilotes colocados muy próximos unos de otros y las tablestacas anchas y delgadas unidas entre sí, se usan como muros de sostenimiento de tierras, presas temporales o mamparos contra filtraciones.

### **2.1.3.- INSTALACIÓN DE PILOTES**

Existen dos formas de usar un pilote en una construcción, una es la de introducir un pilote fabricado en hormigón, de tubos o perfiles de acero o de madera, y la otra es el uso de pilotes de concreto fabricados In-Situ.

La operación de introducir el pilote en el terreno se llama hincado del pilote, lo que se realiza mediante el uso de un martinete, en donde el pilote se coloca, entre guías que mantienen la verticalidad del pilote, y debajo del martillo, el cual funciona generalmente con energía mecánica.

La característica más importante de un equipo para la hincado de pilotes, es su capacidad para guiar el pilote exactamente. Debe ser lo suficientemente fuerte y rígido para mantener el pilote y el martillo en su posición, y con la inclinación fijada, a pesar del viento, las obstrucciones bajo el terreno y el movimiento del martillo. (Das, 2001).

Según bolognesi (2002) los pilotes de hormigón fabricados "in situ" son los que más se usan para cargas entre 30 y 60 toneladas. Estos tipos de pilotes se pueden dividir en dos grupos: pilotes con camisa o tubo de entibación en los que un tubo de metal de paredes delgadas se hinca en el terreno y sirve de molde, y pilotes sin tubo de estibación, en los que el hormigón se coloca en un agujero hecho previamente en el suelo, quedando el hormigón finalmente en contacto directo con el suelo.

Para el desarrollo de este proyecto, y para los efectos del cálculo de esfuerzos y reacciones, se considera el uso de pilotes hincados.

#### **2.1.4.- COMPORTAMIENTO DEL PILOTE DURANTE LA HINCA**

En suelos muy blandos los primeros golpes del martillo pueden hincar el pilote varios metros; de hecho el pilote puede introducirse en el terreno bajo el peso del martillo solamente; sin embargo en los suelos duros cada golpe del martillo esta acompañado por una deformación del pilote y la consiguiente pérdida de energía.

El golpe del martillo produce inicialmente un movimiento del pilote hacia abajo, pero este es seguido por un rebote que representa la compresión elástica temporal del pilote y del suelo que lo circunda. La penetración promedio para varios golpes se puede hallar de la resistencia a la hinca, que es el número de golpes necesario para hincar el pilote una distancia determinada, generalmente 2.5, 15 o 30 cm. (Pilotaje, 2003).

Cuando el pilote es muy largo y la hinca difícil, el comportamiento del pilote es más complejo. En el momento del impacto la parte superior del pilote se mueve hacia abajo; la parte inmediatamente debajo se comprime elásticamente y la punta del pilote permanece momentáneamente fija. La zona de compresión se mueve rápidamente hacia abajo y alcanza la punta del pilote una fracción de segundo después de producirse el impacto. Como resultado de esta onda de compresión, la totalidad del pilote no se mueve hacia abajo en un instante, sino que lo hace en segmentos más cortos. (Gunaratne, 2006).

### 2.1.5.- EFECTOS DEL PILOTE EN EL SUELO

La forma de distribución del esfuerzo, el asentamiento y capacidad máxima de una cimentación por pilotaje, depende del efecto del pilote en el suelo. El pilote, representado por un cilindro de longitud  $L$  y diámetro  $D$ , es una discontinuidad en la masa de suelo, que reemplaza el suelo, según sea instalado por excavación, como un pilar, o por hinca.

La excavación altera el suelo cambiando la forma de distribución del esfuerzo; el suelo puede ser comprimido hacia adentro, desorganizándose la estructura de las arcillas y reduciéndose la compacidad de las arenas. Al forzar un pilote dentro del agujero o al colocar concreto fresco, puede que se fuerce parcialmente el suelo hacia afuera, originándose más alteración. (Das, 2001).

La hinca del pilote origina aun mayor alteración. El desplazamiento producido por la hinca de los pilotes tiene dos efectos. Primero, se produce un levantamiento del terreno en los suelos de arcilla saturada y en los no cohesivos compactos; Segundo, se establece una fuerte presión lateral en el suelo. (Pilotaje 2003).

Según Bowles (1996) la hinca de pilotes con martillo produce choque y vibración que se transmite, a través del terreno, a las estructuras contiguas. Si el suelo es arena muy suelta, fina y saturada, las vibraciones pueden causar una licuefacción temporal de la misma, con la correspondiente pérdida de capacidad de carga, produciéndose graves daños; aunque esto raramente ocurre.

El pilote transfiere la carga al suelo de dos maneras. Primero, por la punta, en compresión, que se llama resistencia por la punta, y segundo, por esfuerzo cortante a lo largo de su superficie lateral, llamado comúnmente fricción lateral (aunque una verdadera fricción no se desarrolla en todos los casos).

Los pilotes hincados a través de estratos débiles hasta que su punta descansa en un estrato duro, transfieren la mayor parte de su carga por la punta y algunas veces se les llama pilotes resistentes por la punta. En suelos homogéneos los pilotes transfieren la mayor parte de su carga por fricción lateral y se les llama pilotes de

fricción o pilotes flotantes; sin embargo, la mayoría de los pilotes desarrollan ambas resistencias. (Pilotaje, 2003).

## **2.1.6.- CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES**

### **2.1.6.1.- ANÁLISIS ESTÁTICO**

La máxima capacidad de carga de un pilote o pilar es la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de la carga máxima.

En el pilote resistente por la punta, esta se asemeja a una cimentación por superficie enterrada profundamente. Según Bowles (1996) cuando se carga el pilote se forma un cono de suelo no alterado que se adhiere a la punta. Como la punta va penetrando mas profundamente conforme aumenta la carga, el cono fuerza el suelo hacia los lados cortando la masa a lo largo de una superficie curva. Si el suelo es blando, compresible o tiene un modulo de elasticidad bajo, la masa situada mas allá de la zona de esfuerzo cortante se comprime o deforma, permitiendo que el cono penetre mas.

Esta es una forma de esfuerzo cortante local similar al descrito para las cimentaciones poco profundas. Si el suelo o la roca son muy rígidos, la zona de esfuerzo cortante se extiende hasta que el desplazamiento total permita al cono perforar el suelo hacia abajo.

Según Bowles (1996) existen diferentes factores de capacidad de carga que se usan para resolver determinados problemas. Los factores para cimentaciones poco profundas se aplican a los pilotes resistentes por la punta, cuando descansan en estratos duros, y sobre los cuales se encuentran formaciones débiles. También se aplican a los pilotes embebidos en arcillas blandas y arenas sueltas. Los factores más altos se aplican solamente a las arcillas mas duras y a las arenas muy compactas, en

las cuales la punta del pilote queda embebida a una profundidad de 10D. Los factores para condiciones intermedias entre estos límites, se pueden hallar por interpolación.

Si los pilotes son hincados en el suelo, el ángulo de fricción que debe usarse es el que se obtiene después de la hinca. Según Terzagui (1973) en las arenas se produce un aumento de 2 a 5 grados sobre el valor obtenido antes de la hinca. Si la colocación del pilote se hace con chiflón de agua o con perforación previa, el ángulo no cambia prácticamente.

La fricción lateral que actúa a lo largo del fuste del pilote es igual a la suma de la fracción de adherencia en la superficie del pilote, más la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inmediatamente adyacente al pilote.

Si  $f$  es la fricción lateral:

$$f = c' + 'h \tan\Phi$$

$$f = ca + 'h \tan\Phi$$

Donde  $ca$  es la adherencia y  $\tan\Phi$  el ángulo de rozamiento entre el suelo y la superficie del pilote.

Los valores de  $ca$  y de  $\tan\Phi$  se pueden determinar por una prueba directa de esfuerzo cortante, substituyendo una mitad de la caja del aparato para el ensayo por el material de la superficie del pilote. Los ensayos hechos con pilotes de tamaño natural indican los siguientes valores de  $ca$  son relación a los de  $c$  en arcillas saturadas, obtenidos en pruebas de esfuerzo cortante sin drenaje:

$$ca = 0.9c \quad c < 0.5 \text{ Kg/cm}^2 \quad (6b)$$

$$ca = 0.9 + 0.6(0.49c - 1) \quad c > 0.5 \text{ Kg/cm}^2 \quad (6c)$$

La capacidad total de carga de un pilote es nominalmente, la suma de la resistencia por la punta que se ha movilizado y el producto de la fricción unitaria lateral movilizada por el área de la superficie lateral del pilote.

Sin embargo, la carga máxima o de falla, no es necesariamente igual a la suma de la resistencia máxima por la punta y la fricción lateral máxima. Primero, porque puede que no se movilicen simultáneamente las resistencias por la punta y por fricción lateral en las diferentes secciones del fuste del pilote. (Pilotaje, 2003).

El pilote hincado tiene, generalmente, una capacidad de carga máxima mayor que la del pilote colocado con excavación previa o con chiflón de agua, porque los valores máximos, tanto el de resistencia por la punta como el de fricción, se alcanzan durante la hinca.

Una segunda causa de la diferencia entre la capacidad de carga calculada y la real de los pilotes, proviene de la fricción negativa. Según Bowles (1996) los esfuerzos que se desarrollan en el suelo por el pilote y por cualquier carga superficial, como el relleno, no soportada directamente por los pilotes, hace que el suelo no consolide. Si hay algún estrato muy compresible a algún nivel por arriba de la punta del pilote, la consolidación hará que el suelo de arriba se mueva hacia abajo con respecto al pilote.

Estos estratos en vez de soportar el pilote, debido a su movimiento descendente, añaden carga al pilote. Esta fricción negativa ha sido tan grande en algunos casos, que ha producido la falla de la cimentación por pilotaje y se debe por lo tanto, considerar en el proyecto al momento de análisis de los programas.

El método mas seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga. Los ensayos de carga se hacen para determinar la carga máxima de falla de un pilote o grupo de pilotes o para determinar si un pilote o grupo de pilotes es capaz de soportar una carga sin asentamiento excesivo o continuo. (Bolognesi, 2002).

Los ensayos de carga se pueden hacer construyendo una plataforma o cajón en la cabeza del pilote o grupo de pilotes, en la cual se coloca la carga, que puede ser arena, hierro, bloques de concreto o agua. Para hacer un ensayo más seguro y más fácilmente controlable, se usan, para aplicar la carga, gatos hidráulicos de gran

capacidad cuidadosamente calibrados. La reacción del gato será tomada por una plataforma cargada o por una viga conectada a pilotes que trabajaran a tracción.

#### **2.1.6.2.- ANÁLISIS DINÁMICO**

Teóricamente, es posible establecer alguna relación entre la capacidad de carga del pilote y la resistencia que ofrece a la hinca con un martillo.

Este análisis dinámico de capacidad de carga del pilote, se ha usado anteriormente en reiteradas ocasiones. En algunos casos, estas formulas han permitido predecir con exactitud la capacidad de carga del pilote, pero en otros no, lo que ha provocado el colapso de algunas estructuras.

Según Gunaratne (2006) la carga que recibe el pilote, y la "falla" producida por la hinca con martillo, ocurren en una pequeña fracción de segundo, mientras que en la estructura la carga se aplica en un lapso que varia de horas a años. Una relación fija entre la capacidad de carga de un pilote obtenido dinámicamente y la obtenida a largo plazo, solo puede existir en un suelo en el que la resistencia a esfuerzo cortante sea independiente de la velocidad de aplicación de la carga. Esto es aproximadamente cierto en un suelo no cohesivo seco y en suelos no cohesivos húmedos de compacidad intermedia o de granos tan gruesos, que el esfuerzo cortante no produzca un esfuerzo neutro apreciable.

En las arcillas y en los suelos no cohesivos, ya sean muy sueltos o compactos, de granos finos y saturados, la resistencia depende de la velocidad con que se desarrolla el esfuerzo cortante; en estos suelos el análisis dinámico puede no tener validez.

### 2.1.7.- CARGAS LATERALES

Un pilote vertical cargado lateralmente se flexa como una viga en voladizo parcialmente empotrada. Si las cargas son pequeñas, la resistencia del suelo es bastante elástica.

Según Gunaratne (2006), esta resistencia se puede representar aproximadamente, suponiendo que el suelo reacciona como una serie de resortes horizontales, cuya rigidez se puede expresar como un modulo de reacción  $k$ . La ecuación diferencial de la flexión de la viga se puede resolver para flechas y momentos, así como la presión del suelo, por aproximaciones sucesivas o por “aproximación de elementos finitos”. Tales soluciones se encuentran en forma gráfica dimensional para supuestas variaciones de  $k$ . Las curvas desarrolladas por J. E. Bowles, dan los valores de las flechas, momentos flexionantes y presiones del suelo para un pilote de rigidez constante y para un  $k$  aumentado linealmente con la profundidad:  $k = k'z$ . La mejor manera de determinar los valores de  $k$  o  $k'$  de la formación del suelo, es a través de un ensayo de carga de un pilote de tamaño natural.

Las curvas se expresan en términos de la rigidez relativa,  $T$  en cm.:

$$T = \frac{(E \cdot I) \cdot 0.2}{(k')}$$

$E$  e  $I$  se refieren a la sección transversal del pilote. La profundidad se expresa por el coeficiente adimensional  $Z$ .

$$Z = L/T$$

Si la carga lateral es suficientemente grande, la presión en el suelo excederá la resistencia del mismo y el pilote fallara. Algunas veces se calcula la falla de resistencia como falla del empuje pasivo de tierra en la parte superior del pilote.

Lo indicado anteriormente no es real, porque en teoría de empuje pasivo, la deformación por cortante se supone bidimensional o plana mientras que el pilote cargado lateralmente fallara por esfuerzo cortante tridimensional a una presión que excede el empuje pasivo generado. (Gunaratne, 2006; Pilotaje 2003).

Los resultados de ensayos de carga típicos indican que cuando los pilotes verticales están embebidos totalmente en el suelo, pueden soportar cargas laterales de solamente 1/10 a 1/5 de su capacidad de carga vertical, sin una flecha excesiva (menos de 1.25 cm.). Si es necesaria una mayor rigidez o resistencia lateral, se deben emplear pilotes inclinados.

## 2.2.- MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico avanzado que permite obtener una aproximación de la solución de un problema de contorno, asociado a una ecuación diferencial, ordinaria o en derivadas parciales, bajo ciertas condiciones de frontera. Este método consiste básicamente, en aproximar la solución de un problema de frontera de clase  $C^2$ , por la solución del problema equivalente planteado sobre un subespacio de dimensión finita. Usualmente la base de este espacio es generado por funciones lineales, que en el caso de mejorar la precisión de la solución se tendría que realizar un refinamiento de malla, lo que conduce a la búsqueda de algoritmos de convergencia rápida para la solución de grandes sistemas de ecuaciones lineales. (Obando, 2004).

Este método constituye un método numérico destinado a resolver mediante ecuaciones matriciales las ecuaciones diferenciales que se plantean en sistemas discretos para estructuras, o continuos para campos.

En general, el método de los Elementos Finitos, se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones, respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o mas generalmente un problema de mecánica de medios continuos.

Una importante propiedad del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente mas finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones planteada, lo cual se puede calcular rápidamente a través de un software computacional. (Frías, 2004).

## 2.3.- FORTRAN

El FORTRAN (*FORmula TRANslator*) es el primer lenguaje científico de programación, siendo desarrollado a fines de la década de los 50, pero es aún ampliamente utilizado en aplicaciones científicas y de ingeniería. La última versión de FORTRAN actualmente es la versión FORTRAN 90, que reemplazó a la versión FORTRAN 77 a comienzos de la década de los 90. El FORTRAN 90 incorpora nuevas estructuras y características en su sintaxis, si bien aún es compatible con la anterior versión.

En los primeros tiempos de la informática cualquier cálculo que implicara la evaluación de fórmulas matemáticas había de hacerse mediante complicados programas, que traducían esas fórmulas al lenguaje del ordenador, muy primitivo. EL FORTRAN es un lenguaje de alto nivel, orientado a facilitar las cosas al usuario, y que permite escribir el programa de manera casi idéntica a como se escriben las fórmulas en un papel. (Velasco, 2001).

En FORTRAN las instrucciones que el usuario transmite al ordenador se encuentran en un fichero de texto (en código ASCII), que es necesario escribir (utilizando un editor de texto cualquiera). El nombre del fichero sigue las convenciones del sistema operativo del ordenador. En DOS un programa FORTRAN suele tener la extensión '.FOR', por ejemplo, 'CALCULO.FOR'; en Unix es tradicional que la extensión sea '.f', por ejemplo, 'calculo.f'. Los nombres de los programas son libres (salvo ciertas limitaciones de longitud y tipos especiales de caracteres que no pueden aparecer en el nombre del fichero).

Al contrario que el BASIC, que es un lenguaje *interpretado*, el FORTRAN es un lenguaje *compilado*. Esto significa que, una vez escrito el programa, éste ha de ser traducido en bloque al lenguaje máquina, o sea, el lenguaje que entiende el procesador del ordenador, mediante un proceso llamado *compilación*. (Fortran).

## 2.4.- MATHCAD13

Mathcad es un entorno de documentación técnica con prestaciones de cálculo numérico y simbólico, que permite explorar problemas, formular ideas, analizar datos, modelar y chequear escenarios, determinar la mejor solución... y finalmente documentar, presentar y comunicar los resultados.

Es un programa algebraico de computadora similar a Mathematica, distribuido por Mathsoft. A diferencia de Mathematica, MathCad es más intuitivo de usar, permite el uso de plantillas de funciones en las que solo es necesario escribir los valores deseados, incluso para graficar funciones.

Algunas de las capacidades matemáticas de Mathcad están basadas en parte del código del programa algebraico Maple (Núcleo MathSoft de Maple o Mathsoft Kernel Maple, MKM). Mathcad se encuentra organizado como una hoja de trabajo, en las que las ecuaciones y expresiones se muestran gráficamente, no como simple texto.

Mathcad es una herramienta técnica de gran flexibilidad que incorpora todas las funcionalidades de interactividad propias de las hojas de cálculo, una gran potencia debida a su extensa librería de funciones y una completa integración con muchas de las herramientas utilizadas en ingeniería (Excel, AutoCAD, MATLAB, Visio, ODBC, etc.). Sus prestaciones de documentación técnica, junto con una notación matemática clásica, permiten que los cálculos sean auto-documentados y ahorrar así mucho tiempo al ingeniero a la hora de crear informes técnicos sobre los cálculos realizados.

Mathcad incorpora además un conjunto de herramientas software adicionales que le permiten realizar simulación de sistemas dinámicos, CAD 2D paramétrico y gráficos técnicos. Su precio le convierte en una herramienta muy asequible que puede ser adoptada por las empresas de ingeniería como una herramienta estándar o corporativa.

### **2.4.1.- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES**

Mathcad contiene herramientas complementarias para desarrollar proyectos técnicos desde el concepto hasta su distribución final. Dentro de las ventajas que tiene este software, están:

- Calcular, modelar y visualizar las ideas técnicas.
- Resolver cálculos y visualizar los resultados.
- Documentar el trabajo (incluidos los cálculos) con notación científico-matemática.
- Integrar datos entre programas y sistemas: Microsoft Office (Excel, Visio y otros productos de la familia Office), AutoCAD, Axum, SmartSketch, VisSim, MATLAB, bases de datos ODBC (incluidas Microsoft Access y FoxPro).
- Distribuir documentos y colaborar a través de redes.
- Crear estándares a través de toda la organización: Mathcad puede ser utilizado por diseñadores, técnicos y directores.

### **2.4.2.- AREAS DE APLICACIÓN**

El amplio abanico de herramientas disponibles en y para Mathcad lo convierten en un entorno de resolución de problemas en las siguientes áreas:

Ingeniería mecánica y termodinámica.

Ingeniería civil y arquitectura.

Ingeniería eléctrica y teoría de control.

Procesado de señales digitales.

Ingeniería química.

Matemática y estadística.

Finanzas y economía.

## **CAPITULO III**

### **ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS PROGRAMAS EN FORTRAN IV**

### **3.1.- PROGRAMACION EN FORTRAN**

Se eligieron dos programas del texto original, el primero es "LATERAL PILES", y el segundo, "STATIC PILES".

Los programas creados por J. E. Bowles, "LATERAL PILES" y "STATIC PILES", se encuentran en el **ANEXO A** de este proyecto, escritos en FORTRAN 2.0.

El desarrollo de los programas hechos en el software de programación FORTRAN IV, "LATERAL PILES" y "STATIC PILE", consta del siguiente orden en los procedimientos de ejecución:

#### **3.1.1.- Identificación de las variables**

Se refiere a la clasificación de los parámetros que se ingresan en los programas, tipo de número, si son vectores, si forman matrices, etc., en donde se deben clasificar y definir todas las variables que serán incluidas en el programa como valores reales o enteros.

Para la clasificación de los parámetros utilizados en la programación, se utilizan los siguientes comandos:

- DIMENSION: Declaración que indica el tipo de variable
- DOUBLE PRECISION: indica el tipo de aproximación de la variable

#### **3.1.2.- Lectura de las variables**

En esta etapa, el programa reconoce o lee los valores ingresados al programa para ser ejecutado, asignando a cada valor una letra que la identifique en el desarrollo del programa.

Paralelamente, se muestran los valores ingresados, a través de un operador de salida, el cual enseña los datos con su leyenda respectiva.

La lectura de las variables se realiza a través del siguiente comando:

READ(1,10)

donde "1" señala un archivo en donde están definidas todas las variables que definen un determinado problema a analizar con el programa, las cuales deben ser ingresadas previamente a la ejecución del programa; "10" señala una posición en donde existe un determinado formato de escritura o lectura, el cual determina la cantidad de espacios a utilizar por variable, cantidad de decimales, altura de número, etc. Cabe señalar que el formato en el cual lee el archivo debe tener el mismo orden para ingresar los datos del problema.

Para visualizar los datos el programa utiliza la siguiente sentencia:

WRITE(3,10)

En donde "3" señala la hoja o pantalla en donde serán mostrados los datos ingresados al problema, y "10", indica la posición en donde se encuentra el formato a utilizar por el programa al mostrar los datos.

### **3.1.3.- Clasificación de parámetros**

En esta etapa, el programa clasifica los datos entregados, utilizando expresiones lógicas, sentencias, y fórmulas predeterminadas, las cuales determinan el uso o no uso de ciertas fórmulas para la obtención de los resultados, o también pueden determinar el método de cálculo predeterminado en la programación, siendo algunas de estas las siguientes:

a.LT.b: "a" es menor que "b"

a.GE.b: "a" es mayor o igual que "b"

Agregando la sentencia IF:

IF(a.GE.b)THEN...: si "a" es mayor o igual que "b", entonces...

En donde "THEN" nos indica que se debe cumplir con la afirmación que le sigue, o cierto valor debe ser igual a otro, etc.

### 3.1.4.- Generación de parámetros de cálculo

Una vez que el programa clasifica los parámetros y determina las fórmulas y procedimientos a seguir, se comienza con el método de cálculo que esta programado, que para el caso de programas de ingeniería, son los métodos de cálculo a través de Elementos Finitos, los que generan matrices de nxn, las cuales a través de iteraciones acotan los valores encontrados, convergiéndolos a los resultados exactos.

A modo de ejemplo:

```
DO 21 I = 1,N
  IF(a.LT.b)GO TO 21
21 .....
```

Esto quiere decir: el valor de I, se hace correr desde el valor I= 1, hasta el valor I= N, en donde cada iteración obliga al programa a verificar si el valor de "a" es menor que "b", y si es así, el programa continua ejecutándose en 21, cuya posición indica el paso siguiente en la ejecución del programa, si no, el programa asigna un nuevo valor a I, cuantas veces sea necesario hasta que se cumpla la sentencia exigida.

Cabe señalar que las matrices generadas, son mostradas por el programa, seguidas de su respectiva sentencia (leyenda explicativa), a través de la siguiente sentencia:

```
WRITE(3,*)(I,J)
```

En donde la matriz con los valores de (I,J) son mostrados en la pantalla "3", señalada anteriormente.

### 3.1.5.- Obtención de los resultados

La obtención de los resultados, generalmente es a través de la interacción de las matrices generadas anteriormente, cuyos resultados son mostrados como se señaló anteriormente.

En resumen, se tiene el procedimiento típico de programación para resolver un problema de ingeniería a través del “método de elementos finitos”, en donde claramente se puede apreciar la declaración de los parámetros y valores, junto con el ingreso de datos, la generación de las sentencias y fórmulas a emplear, así como también las matrices generadas, a través de los procedimientos de iteración, y finalmente, se aprecian los cálculos y resultados finales.

FORTRAN, como se señaló anteriormente, se basa en una programación demasiado estricta en cuanto a la declaración de variables y a su entrega de resultados, en comparación con otros software mas recientes, en donde la metodología de programación es menos estricta, y a la vez, presenta formatos de entrega de datos mucho mas completos que FORTRAN, el cual es completamente operado en el sistema MS-DOS, ya sea para la programación, como para la ejecución de los programas.

Otro factor importante que señalar, es que para el ingreso de valores o datos de un determinado problema a analizar en el programa, este, se debe realizar siguiendo en forma muy estricta el formato especificado en el programa, ya que cualquier mínimo detalle conduce a un error en la ejecución de este.

Según lo estudiado y modificado para la compilación de estos programas, nos damos cuenta que el programa de ingreso de datos debe ser programado bajo el mismo formato para cada valor a ingresar; además se debe hacer mención a errores de compilación encontrados al momento de ejecutar los programas, los cuales debieron ser chequeados y mejorados para la ejecución de estos, pero al no tener el programa de ingreso de datos, la ejecución de los programas quedaba en carácter de “Inactivo”.

### 3.2.- PROBLEMAS DE EJECUCIÓN

A continuación se señalan los principales problemas encontrados en la programación original de "LATERAL PILES" y de "STATIC PILES" para la compilación de datos, los cuales fueron arreglados y corroborados con la ayuda de profesores conocedores de FORTRAN, los cuales asistieron en los arreglos:

- Ambos programas no contaban con el "manejador" o programa principal, que es la sentencia "PROGRAM", seguida del nombre del programa, la cual indica el punto de partida del programa principal, diferenciándolo de las subrutinas o subprogramas incluidos en el programa principal.

- El segundo problema arrojado por el compilador, se refiere a la base de los datos correspondientes a un problema específico a revisar, cuyo formato de programación no se encontró en el texto guía, y que bien, pudiendo programar dicha entrada de datos, el reconocimiento de estos valores por parte del programa principal hubiera resultado complicada, debido a los estrictos formatos existentes en la programación.

A modo de ejemplo, señalamos el siguiente ejemplo, correspondiente a la lectura de datos de "STATIC PILES":

```
7000 READ(1,1000,END=6000)TITLE,UT1,UT2,UT3,UT4,UT5,UT6,UT7,UT8
1000 FORMAT(20A4/4(A4,6X),4(A8,2X))
      READ(1,101)NP,NM,NNZF,NC,IPRD,NLC,JTSOIL,NDELTA,JJS,LIST,NSTRPT,IU
101 FORMAT(12I5)
```

Claramente, se observa que la lectura de datos sigue un patrón muy minucioso, que conlleva a programar una entrada de datos demasiado minuciosa, que ocuparía valioso tiempo, que puede emplearse en la reprogramación de estos en un software mucho más amigable y de mejores características.

- En la formación de la matriz ASAT, se vio el siguiente problema:

```
C**** END OF ASAT FORMATION--INVERT ASAT MATRIX--USEE GAUSS-JORDAN METHOD
9168 DO 25 K=1,N
      DO 20 J=1,N
      20 IF(J.NE.K)E(K,J)=E(K,J)/E(K,K)
        DO 21 I=1,N
        IF(I.EQ.K) GO TO 21
        DO 21 J=1,N
        IF(J.EQ.K) GO TO 21
        E(I,J)=E(I,J)-E(K,J)*E(I,K)
      21 CONTINUE
```

En donde el programa asigna un mismo procedimiento a dos variables distintas, las que varían a través de iteraciones por separado, lo cual generaba en el programa una iteración sin avance, solo tomando diversos valores y llevando a una “no ejecución” del programa.

La solución a este problema fue la siguiente:

```
C**** END OF ASAT FORMATION--INVERT ASAT MATRIX--USEE GAUSS-JORDAN METHOD
9168 DO 25 K=1,N
      DO 20 J=1,N
      20 IF(J.NE.K)E(K,J)=E(K,J)/E(K,K)
        DO 210 I=1,N
        IF(I.EQ.K) GO TO 210
        DO 21 J=1,N
        IF(J.EQ.K) GO TO 21
        E(I,J)=E(I,J)-E(K,J)*E(I,K)
      21 CONTINUE
    210 CONTINUE
```

En donde se cerró la iteración de cada variable, haciendo posible el desarrollo posterior de la programación.

### **3.3.- CRITERIO DE PROGRAMAS**

Por lo señalado anteriormente, se tomó la determinación de reprogramar ambos programas, "LATERAL PILES" y "STATIC PILES", en un software más avanzado que FORTRAN, que sea de un lenguaje de programación más simple, y que entregue resultados en un formato y en una pantalla de mejores características que FORTRAN, cuya pantalla de ejecución es en el sistema operativo MS-DOS.

Por lo señalado anteriormente, y dadas sus características, propiedades de programación, y entrega de datos, el software que se utilizara para programar nuevamente "LATERAL PILES" y "STATIC PILES", será el software conocido como "MATHCAD13", el cuál se menciona en el capítulo anterior.

# **CAPITULO IV**

## **PROGRAMACION**

## **4.1.- ESTUDIO Y ANALISIS DE LA PROGRAMACION**

En esta etapa, se realiza el estudio y análisis de un pilote para dos casos diferentes de carga, "LATERAL PILES" para el caso de aplicar una carga lateral en la cabeza superior de un pilote, y "STATIC PILES" el cual analiza el diseño de un pilote sometido a carga estática constante.

### **4.1.1.- LATERAL PILES**

#### **4.1.1.1.- Introducción al Problema**

Este programa, calcula la distribución de esfuerzos y desplazamientos en un pilote que recibe una fuerza de corte externa lateral en su parte superior, la cual puede ser producto de un sismo, o algún tipo de impacto.

El análisis estructural realizado para obtener los desplazamientos y esfuerzos, se basa en la teoría de viga sobre fundación elástica, que establece la rigidez del pilote como función del módulo del suelo y la rigidez flexional del pilote ( $EI$ ). Este modelo, permite considerar la variación de las distintas capas de suelo en el perfil mediante el uso de resortes con diferentes valores de rigidez.

Para obtener la rigidez traslacional, rotacional y traslacional acoplada del pilote, se aplica en la cabeza del pilote, una carga lateral o un momento. La constante de resortes se determina usando un módulo del suelo  $K_h$  que representa la resistencia horizontal del suelo.

Estos resortes aportan una rigidez producida por la reacción horizontal del suelo, en donde este aporta una distribución a lo largo del pilote que puede ser constante, lineal, o de carácter parabólico. La reacción horizontal del suelo, se genera mediante el módulo de reacción horizontal, el cual, en el caso de no ser constante, es una función que varía con la profundidad, generalmente, aumentando su valor directamente proporcional con el aumento de la profundidad  $Z$ .

Una vez determinadas las rigideces del elemento, se procede a construir la matriz de rigidez, a partir de la partición de un pilote en “N-1” elementos, los cuales generan interactuando en conjunto, la matriz global K.

Una vez determinada la matriz global K del sistema, se deben determinar, en primer lugar, el vector “P”, correspondiente a los esfuerzos del pilote, y luego el vector “X”, correspondiente a las incógnitas de desplazamientos y giros producidos por los esfuerzos, para así, generar la ecuación general:

$$[P] = [K] * [X]$$

La cual se debe generar en un programa computacional para encontrar las soluciones del problema.

#### 4.1.1.2.- Estimación del módulo de reacción horizontal del suelo, $k_h$

Como se señaló anteriormente, este módulo de reacción horizontal, es una función que depende de la profundidad  $Z_i$ , en la cuál, se genera un nodo en el elemento. Existen procedimientos dados por diferentes autores, los cuales entregan soluciones aproximadas en cuanto a sus resultados.

En este proyecto, se considera el método empleado por el autor J. E. Bowles.

Según Bowles (1996), una manera para estimar el valor de  $k_h$  para diferentes nodos del elemento, en función de la profundidad, es la representada por la ecuación siguiente:

$$k_h = A_h + B_h * Z^n$$

Donde  $A_h$  y  $B_h$  son evaluados usando las expresiones de capacidad, obteniéndose de la siguiente manera:

$$A_h = F_{w1} * C_m * C(c * N_c + 0.5\gamma * B * N\gamma)$$

$$B_h = F_{w2} * C_m * C * \gamma * N_q$$

En donde Z es la profundidad de evaluación.

Los siguientes son valores sugeridos por Bowles (1996) para las constantes:

- c = Cohesión del suelo en  $\text{kN/m}^2$
- B = Diámetro del Pilote en m.
- $\gamma$  = Densidad del suelo
- C =  $40 \text{ kN/m}^3$
- $C_m$  = 1.5 – 2.0
- n = 0.4 – 0.6
- $F_{w1}, F_{w2}$  = 1, para pilotes de perfiles de acero, y en suelos cohesivos.
- $F_{w1}$  = 1.3 – 1.7, para pilotes circulares
- $F_{w2}$  = 2.0 – 4.4, para pilotes circulares.

Además con el valor del ángulo de fricción interna  $\Phi$ , según diferentes autores, se pueden determinar las constantes de capacidad, de acuerdo a la tabla 1:

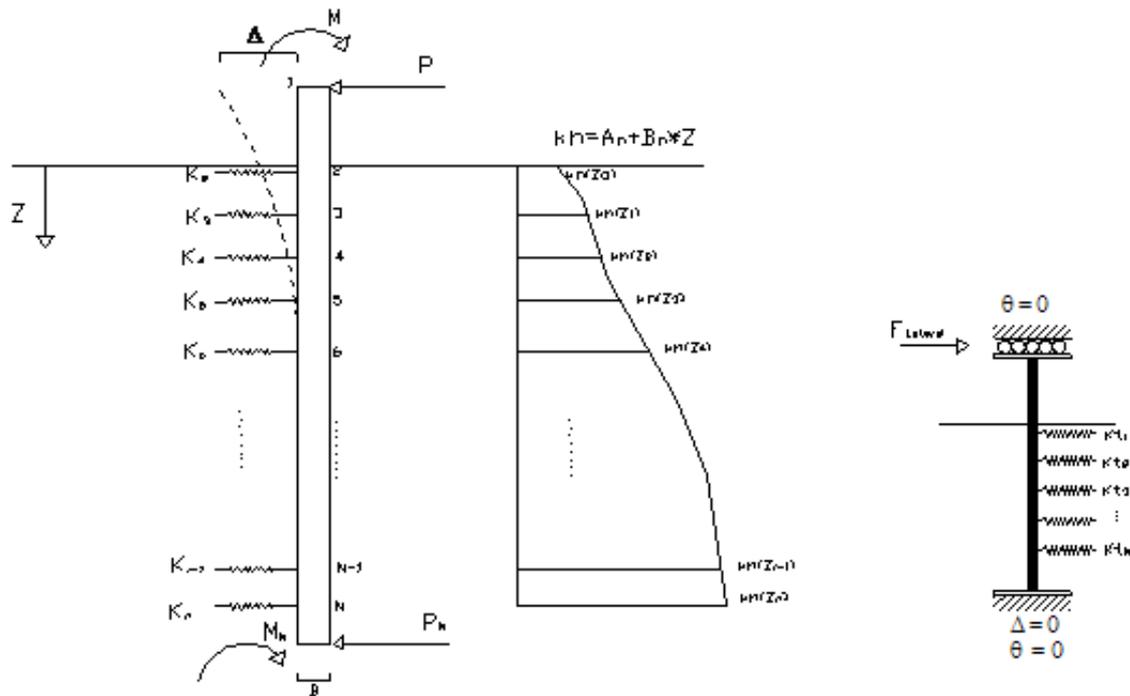
Bearing Capacity Factors								
$\phi$	Terzaghi's (1943) Expression			Hansen, Meyerhoff, and Vesic's Expressions		Hansen (1970) $N_\gamma$	Meyerhoff (1951, 1963) $N_\gamma$	Vesic (1973, 1975) $N_\gamma$
	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_c$	$N_q$			
0	5.7	1.0	0.0	5.14	1.0	0.0	0.0	0.0
5	7.3	1.6	0.5	6.49	1.6	0.1	0.1	0.4
10	9.6	2.7	1.2	8.34	2.5	0.4	0.4	1.2
15	12.9	4.4	2.5	11.0	3.9	1.2	1.1	2.6
20	17.7	7.4	5.0	14.8	6.4	2.9	2.9	5.4
25	25.1	12.7	9.7	20.1	10.7	6.8	6.8	12.5
30	37.2	22.5	19.7	30.1	18.4	15.1	15.7	22.4
35	57.8	41.4	42.4	46.4	33.5	34.4	37.6	48.1
40	95.7	81.3	100	75.3	64.1	79.4	93.6	109.3
45	172	173	298	134	135	201	262.3	271.3

**TABLA 1: Factores de capacidad  $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$ .**

Fuente: *gunaratne (2006)*

Con todos estos valores, se puede obtener en función de la profundidad, el valor del módulo de reacción horizontal del suelo,  $k_h(Z)$ , el cual será calculado por el programa diseñado.

En la figura 1, se puede apreciar la distribución de  $k_h$  en el suelo, lo cual, genera las reacciones en el pilote:



**FIGURA 1:** Distribución de Esfuerzos y reacciones entre un pilote sometido a carga lateral y el suelo; Modelamiento del pilote.  
Fuente: Elaboración Propia

En general, se encuentran las rigideces en el elemento para “N” nodos, y sus valores son incluidos en la generación de la matriz global de rigidez del sistema.

La resistencia lateral del suelo, para cada elemento, según Gunaratne (2006), está dada por las siguientes ecuaciones:

Para nudos superficiales:

$$K_j = 0.5 * L * B * kh$$

Para nudos profundos:

$$K_j = L * B * kh$$

En donde

- L = Longitud tributaria debido a la subdivisión del pilote en m.
- B = Ancho o Diámetro del pilote en m.

#### 4.1.1.3.- Método de análisis, matriz de rigidez

Este método conocido como el “método de elementos finitos” con el cual, se obtendrá mediante la partición del elemento en “N” nodos, la matriz de rigidez general del sistema.

En primer lugar, se discretiza el pilote en un número unidimensional de elementos, tal como se muestra en la figura 2:

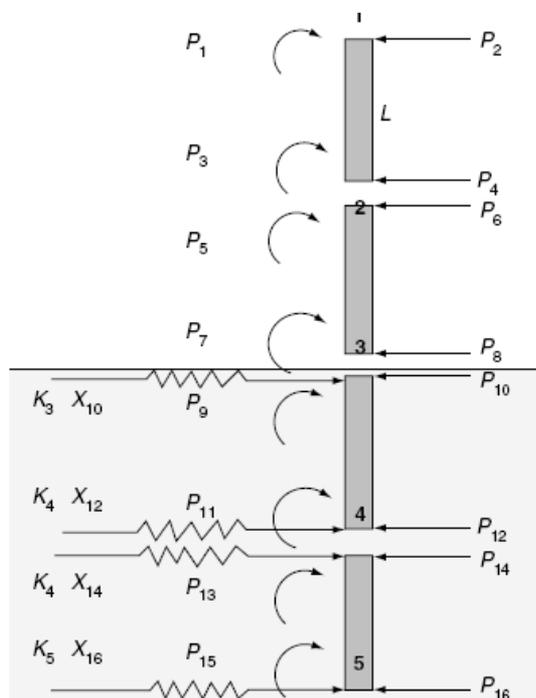


FIGURA 2.1: División de un pilote en subelemento. Estado de reacciones  
Fuente: Gunaratne (2006)

En donde se tiene:

$1, 2, \dots, N$	Numero de nodo
$P_2, P_4, P_6, \dots$	Fuerzas laterales internas en los elementos del pilote, concentradas en los nodos.
$P_1, P_3, P_5, \dots$	Momentos internos en los elementos del pilote concentrados en los nodos.
$X_2, X_4, X_6, \dots$	deflexión nodal de cada elemento del pilote
$X_1, X_3, X_5, \dots$	rotación nodal de cada elemento del pilote.
$K_3, K_4, K_5, \dots$	resistencia lateral del suelo de cada elemento, representada por la rigidez elástica.

Basado en las relaciones de rotación-deflexión del análisis estructural, se tiene que para el primer elemento a modo de ejemplo, el sistema de ecuaciones matriciales queda definido de la siguiente manera y tomando en cuenta el elemento base de la figura 2.2:

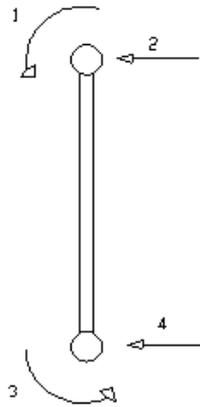


FIGURA 2.2: Elemento base de diseño

Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4EI/L & 6EI/L^2 & 2EI/L & -6EI/L^2 \\ 6EI/L^2 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & -12EI/L^3 \\ 2EI/L & 6EI/L^2 & 4EI/L & -6EI/L^2 \\ -6EI/L^2 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 12EI/L^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}^T$$

que es de la forma:

$$P = K \cdot X,$$

donde k es la matriz de rigidez local del elemento.

#### 4.1.1.4.- Matriz global de rigidez para un elemento dividido en "N" nodos:

Para generar la matriz global de rigidez del pilote, la cual debe ser programada en el software, hay que obtener las matrices de rigidez locales para los elementos, para así, unir los elementos de estas matrices en la matriz global del sistema. Cabe mencionar, que estas matrices de rigidez, fueron estudiadas y obtenidas en los cursos de métodos matemáticos para ingeniería y en el de Computación para ingeniería estructural.

La matriz de rigidez rotación-deflexión que se ocupa es la siguiente:

$$k = \begin{bmatrix} 4EI/L & 6EI/L^2 & 2EI/L & -6EI/L^2 \\ 6EI/L^2 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & -12EI/L^3 \\ 2EI/L & 6EI/L^2 & 4EI/L & -6EI/L^2 \\ -6EI/L^2 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 12EI/L^3 \end{bmatrix}$$

En donde E es el modulo de elasticidad del pilote, I es su inercia, y L corresponde al largo  $L_i$ , de cada elemento.

En primer lugar, hay que generar la matriz de rigidez para el primer elemento, lo cual se hace de la siguiente forma:

Para el elemento 1:

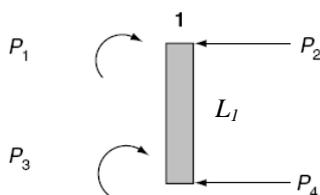


FIGURA 3: Elemento 1 de la partición de un pilote  
FUENTE: Gunaratne (2006)

$$k_1 = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} & k_{2,4} \\ k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} & k_{3,4} \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & k_{4,4} \end{bmatrix}$$

Para el elemento 2:

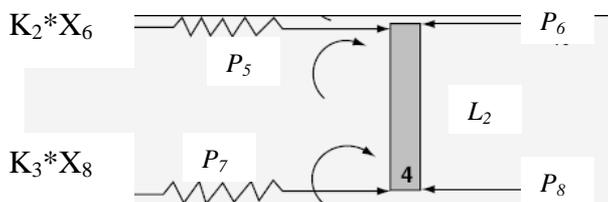


FIGURA 4: Elemento 2 de la partición de un pilote  
FUENTE: Gunaratne (2006)

$$k_2 = \begin{bmatrix} k_{3,3} & k_{3,4} & k_{3,5} & k_{3,6} \\ k_{4,3} & k_{4,4} + K_2 & k_{4,5} & k_{4,6} \\ k_{5,3} & k_{5,4} & k_{5,5} & k_{5,6} \\ k_{6,3} & k_{6,4} & k_{6,5} & k_{6,6} + K_3 \end{bmatrix}$$

Se debe considerar la rigidez aportada por el suelo a través de los resortes en cada nodo.

para el elemento 3:

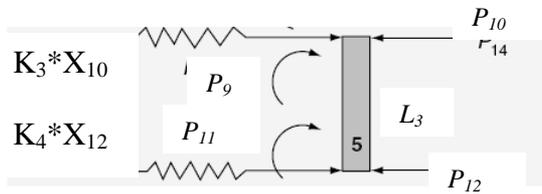


FIGURA 5: Elemento 3 de la partición de un pilote  
FUENTE: Gunaratne (2006)

$$k_3 = \begin{bmatrix} k_{5,5} & k_{5,6} & k_{5,7} & k_{5,8} \\ k_{6,5} & k_{6,6} + K_3 & k_{6,7} & k_{6,8} \\ k_{7,5} & k_{7,6} & k_{7,7} & k_{7,8} \\ k_{8,5} & k_{8,6} & k_{8,7} & k_{8,8} + K_4 \end{bmatrix}$$

si por ejemplo, N = 5, se llegaría hasta el elemento 4, definido de la siguiente manera:

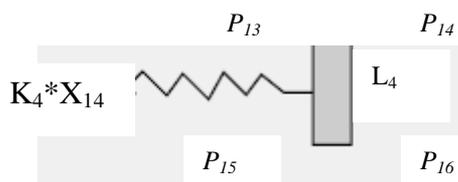


FIGURA 6: Elemento 4 de la partición de un pilote  
FUENTE: Gunaratne (2006)

$$k_4 = \begin{bmatrix} k_{7,7} & k_{7,8} & k_{7,9} & k_{7,10} \\ k_{8,7} & k_{8,8} + K_4 & k_{8,9} & k_{8,10} \\ k_{9,7} & k_{9,8} & k_{9,9} & k_{9,10} \\ k_{10,7} & k_{10,8} & k_{10,9} & k_{10,10} \end{bmatrix}$$

Con estos primeros términos, para  $N = 4$ , nos podemos dar cuenta de la forma que tiene la matriz global  $K$  del sistema, para el elemento que se desea evaluar. La correcta ubicación de cada elemento, es fundamental a la hora de formar la matriz de rigidez global del sistema.

De lo anterior, se puede generar una matriz global, a partir de la secuencia encontrada con el análisis de los elementos anteriores, la cuál se señala a continuación para “ $N$ ” nodos, tomando “ $N-1$ ” elementos, y generando una matriz cuadrada del orden de “ $(2N+2) \times (2N+2)$ ”.

La forma de la matriz global de rigidez del sistema para  $N+2$  nodos, se encuentra en el **ANEXO B** (considerando el elemento de la superficie).

De la matriz de rigidez global del sistema, se puede concluir que para un número de nodos “ $N$ ”, se generan “ $2N$ ” incógnitas, además, en otras palabras:

Si:

$N = 5$      $N^\circ$  de nodos

$N-1 = 4$      $N^\circ$  de elementos

$2N = 10$      $N^\circ$  de incógnitas

$2N+2 = 12$     orden de la matriz de rigidez global, o sea  $K_{12,12}$ .

Como se definió anteriormente con respecto a los esfuerzos,  $P_1$ , es el momento generado en la parte superior del pilote;  $P_2$ , es la fuerza externa horizontal (lateral) solicitante del pilote;  $P_{2N-1}$ , corresponde al momento generado en la base inferior del pilote y finalmente  $P_{2N}$  corresponde al esfuerzo horizontal en la base inferior del pilote; o sea:

$P_1 = M_1$ , momento requerido para refrenar la rotación en la cabeza del pilote.

$P_2 = P$ , carga axial aplicada en la cabeza superior del pilote (en la superficie)

$P_{2N-1} = M_2$ , momento generado en la base inferior del pilote

$P_{2N} = P_{inf}$ , se refiere a la reacción inferior en la base del pilote

En la figura 7, se aprecia lo descrito anteriormente.

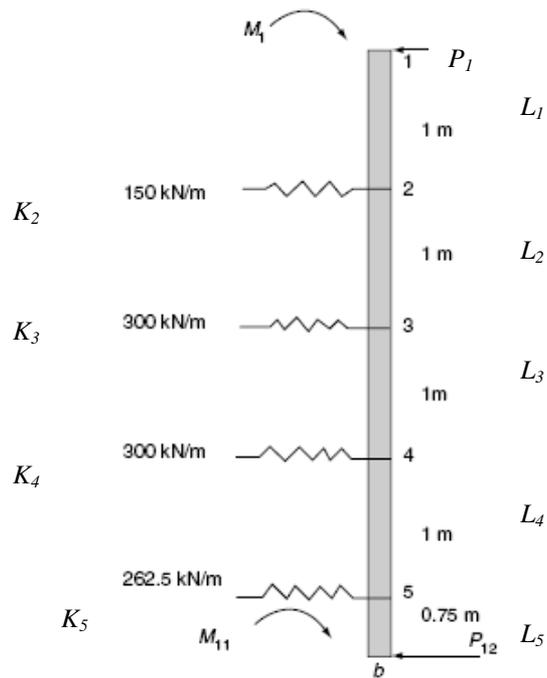


FIGURA 7: Pilote particionado en 4 elementos  
FUENTE: Gunaratne (2006)

#### 4.1.1.5.- Análisis de Esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos, se considerara un vector “P” de orden “ $2N \times 1$ ”, el cuál, contiene la fuerza externa lateral solicitante, ingresada como dato, además de estar compuesto por las incógnitas que se definen a continuación:

$$P = \begin{bmatrix} M_1 \\ P_2 \\ M_3 \\ P_4 \\ M_5 \\ P_5 \\ M_6 \\ P_6 \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{2N} \\ P_{2N} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \\ \theta_2 \\ \Delta_2 \\ \theta_3 \\ \Delta_3 \\ \theta_4 \\ \vdots \\ \theta_{N-1} \\ \Delta_{N-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para el análisis de los desplazamientos y giros generados, se considera el vector “X” de orden “2Nx1”, en el cuál, se señala el desplazamiento máximo generado directamente por el esfuerzo P<sub>2</sub>, además de los giros y desplazamientos generados a medida que se profundiza mas en el pilote.

En este vector “X”, se tienen las siguientes condiciones de borde:

$$X_1 = \theta_1 = 0 \quad \text{no existe giro en la cabeza superior}$$

$$X_{12} = \Delta_6 = 0 \quad \text{se supone el pilote empotrado en la base}$$

$$X_{11} = \theta_6 = 0 \quad \text{se supone el pilote empotrado en la base}$$

En donde la deflexión lateral requerida es “Δ”.

Finalmente se tiene el sistema señalado anteriormente:

$$[P] = [K] * [X]$$

El programa que se cree, debe ser capaz de resolver esta ecuación matricial, ingresando por supuesto las incógnitas y los parámetros que caracterizan un determinado problema de pilotes.

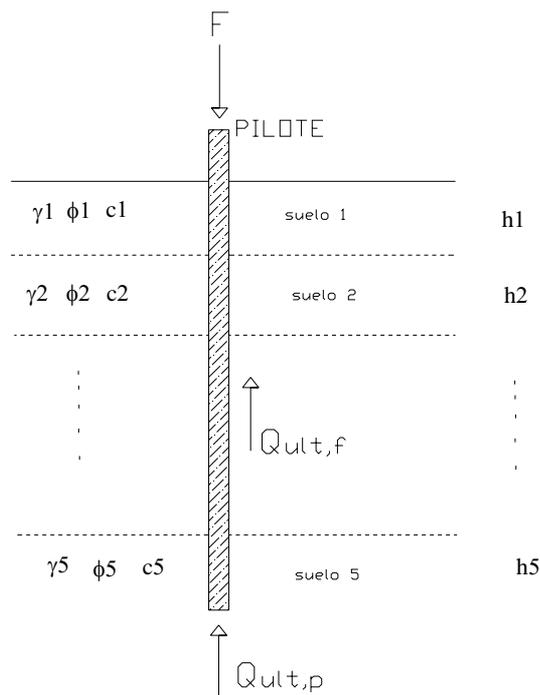
#### 4.1.2.- STATIC PILES

Este programa, verifica la capacidad de carga que tiene un pilote. El pilote, transfiere la carga al suelo de dos maneras: Primero, por la punta, en compresión, a lo que se llama “resistencia por la punta”, y segundo, por esfuerzo cortante a lo largo de su superficie lateral, llamado comúnmente “fricción lateral”.

La máxima capacidad última de carga  $Q_{ult}$  de un pilote es la suma de la resistencia última por la punta  $Q_{ult,p}$ , y por la fricción última lateral  $Q_{ult,f}$ , en el instante de carga máxima:

$$Q_{ult} = Q_{ult,p} + Q_{ult,f}$$

La cual se observa en la figura 8:



**FIGURA 8: Pilote solicitado a una carga axial estática**  
**FUENTE: Elaboración Propia**

Cabe señalar que el peso propio del pilote se debe descontar, debido a que el análisis de esfuerzos se realiza en la base inferior del pilote, por lo que se tiene la ecuación de la siguiente forma:

$$Q_{ult} = Q_{ult,p} + Q_{ult,f} - Pp$$

Siendo  $P_p$  el peso propio del pilote.

Según Gunaratne (2006) el quiebre de la estructura de un pilote se debe a dos razones; La falla del suelo circundante al pilote, y la excesiva sobrecarga externa del pilote. El diseño de un pilote debe ser económico para la obra determinada y resistente a las solicitaciones aplicadas, en donde se deben considerar cargas mayoradas para su diseño. Existen dos tipos de métodos; El primero es el método por tensiones admisibles (ASD), y el segundo es el diseño por resistencia de cargas (LRFD).

Según Gunaratne (2006), para el caso del método de diseño por tensiones admisibles (ASD), se requieren dos condiciones:

- |    |                             |                                  |
|----|-----------------------------|----------------------------------|
| 1) | <b>Cargas Admisibles</b>    | $Q_{apl} * F_s \leq Q_{ult}$     |
| 2) | <b>Deflexión Admisibile</b> | $\Delta_{est} \leq \Delta_{Tol}$ |

En donde  $F_s$ , es el factor de seguridad, el cual va entre los valores de 2.5 a 3.5, siendo este intervalo de carácter conservador,  $Q_{ult}$  es la resistencia última en la base inferior del pilote y  $Q_{apl}$ , es la solicitación externa para este.  $\Delta_{est}$  es la deflexión estimada para un pilote, y  $\Delta_{Tol}$ , es la deformación tolerable que puede tener un pilote.

La determinación de la capacidad por punta y por fricción, se realiza a través del método de Vesic, quien se basa en la teoría de expansión de cavidades, basada en parámetros de esfuerzo efectivo.

#### 4.1.2.1.- Estimación de la capacidad por punta:

La capacidad última de resistencia por punta, se determina a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{ult,p} = A_p (c * N_c + \eta * q * N_q)$$

$$\eta = \frac{1 + 2K_0}{3}$$

$A_p$ :            área de la sección del pilote  
 $c$ :             cohesión del suelo

$N_c$  y  $N_q$ : Factores de capacidad de resistencia de fundaciones  
 $q$ : capacidad de esfuerzo vertical efectivo en Fza/area  
 $K_0$ : coeficiente de presión de tierra para asentamiento.

En donde:

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi \quad \text{para suelos (arenas) granulares}$$

$$K_0 = 0.95 - \text{sen}\phi \quad \text{para suelos (arcillas) finas.}$$

Los factores de capacidad de resistencia dependen del ángulo de fricción interna  $\Phi$ , y se determinan según las tablas 2 Y 3.

$N_c^*$  Factors for Vesic's Bearing Capacity Evaluation Method

$\Phi$ (°)	$I_{rr}$				
	10	50	100	200	500
0	6.97	9.12	10.04	10.97	12.19
5	8.99	12.82	14.69	16.69	19.59
10	11.55	17.99	21.46	25.43	31.59
20	18.83	34.53	44.44	56.97	78.78
30	30.03	63.21	86.64	118.53	178.98
35	37.65	84.00	118.22	166.15	260.15
40	47.04	110.48	159.13	228.97	370.04
45	53.66	144.11	211.79	311.04	516.60

Source: From Bowles, J.E., 2002, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York. With permission.

**TABLA 2: Factor de capacidad de resistencia  $N_c^*$  dado por Vesic para la estimación de la capacidad de soporte por punta de un pilote**  
**FUENTE: Gunaratne (2006)**

$N_q^*$  Factors for Vesic's Bearing Capacity Evaluation Method

$\Phi$ (°)	$I_{rr}$				
	10	50	100	200	500
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.79	2.12	2.28	2.46	2.71
10	3.04	4.17	4.78	5.48	6.57
20	7.85	13.57	17.17	21.73	29.67
30	18.34	37.50	51.02	69.43	104.33
35	27.36	59.82	83.78	117.34	183.16
40	40.47	93.70	134.53	193.13	311.50
45	59.66	145.11	212.79	312.04	517.60

Source: From Bowles, J.E., 2002, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York. With permission.

**TABLA 3: Factores de capacidad de resistencia  $N_q^*$  dado por Vesic para la estimación de la capacidad de soporte por punta de un pilote**  
**FUENTE: Gunaratne (2006)**

#### 4.1.2.2.- Estimación de la capacidad por fricción lateral:

La estimación de soporte por fricción lateral, se determina tomando un elemento del pilote, de altura “dh”, se realiza el análisis que se muestra en la Figura 9, y es igual a la suma de la fracción de adherencia en la superficie del pilote, más la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inmediatamente adyacente al pilote, tal como se menciono anteriormente.

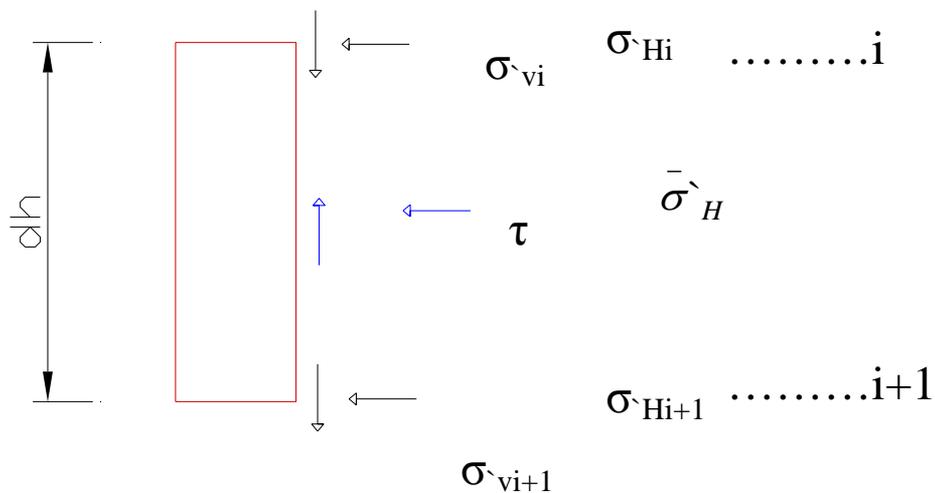


FIGURA 9: Elemento de un pilote para la determinación de la capacidad de soporte por fricción lateral  
FUENTE: Elaboración Propia

En donde se tienen las siguientes formulas:

$\sigma_v$ : Presión vertical de empuje, en donde

$$\sigma_v = \gamma \Delta h$$

$\gamma$ : densidad del suelo a una capa de altura  $\Delta h$ , menos  $1t/m^3$

$\sigma_H$ : Presión lateral del suelo

$$\sigma_H = K_0 * \sigma_v$$

$K_0$ : coeficiente de presión del suelo, en donde:

$K_0 = 1 - \text{sen} \phi$  para suelos (arenas) granulares

$K_0 = 0.95 - \text{sen} \phi$  para suelos (arcillas) finas.

Presión lateral promedio por elemento:

$$\bar{\sigma}_H = \frac{\sigma_{Hi} + \sigma_{Hi+1}}{2}$$

$\tau$ : Fricción entre el suelo y el pilote:

$$\tau = \bar{\sigma}_H * \tan \varphi$$

En donde se tiene que:

$\varphi = \Phi$  para suelos arcillosos  
 $2\Phi/3$  para suelos granulares

La capacidad última de resistencia del pilote en cada elemento o por cada altura de capa de suelo, esta dada por la siguiente ecuación:

$$q_{ult,fi} = \Delta h * \bar{p} * \tau_i$$

En donde la capacidad de soporte por fricción lateral del pilote, se define como:

$$Q_{ult,f} = \sum_{i=1}^n q_{ult,fi}$$

Para la determinación de la capacidad final de soporte lateral se recomienda el uso de una tabla de valores, en donde la primera columna, corresponde a la profundidad en que se encuentra cada capa, seguida por la estimación de la presión de empuje vertical, seguido por el promedio de esta última, luego la determinación de la presión lateral del suelo, la columna de la fricción entre el pilote y el suelo, para finalizar con la capacidad de soporte por fricción de cada elemento y su correspondiente sumatoria final.

Finalmente se tiene:

$$Q_{ult} = Q_{ult,p} + Q_{ult,f} - Pp$$

En donde la carga aplicada multiplicada por el factor de seguridad FS, debe ser menor que la capacidad de soporte  $Q_{ult}$  final del pilote, para que se cumpla el diseño por el método ASD o mas bien conocido como el método de tensiones admisibles.

El programa STATIC PILES, nos entrega el valor de esta capacidad máxima de carga, en donde se puede trabajar con la dimensión del pilote hasta que este cumpla con el criterio de diseño establecido.

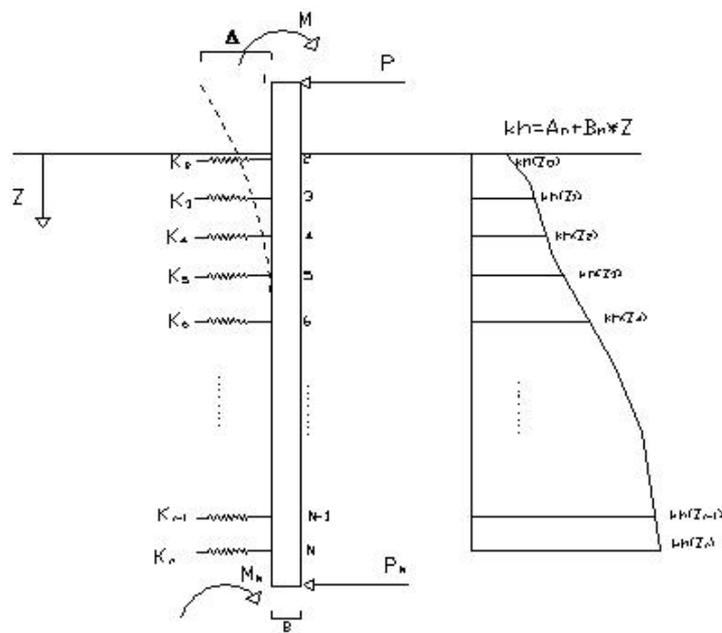
## 4.2.- PROGRAMACIÓN EN DETALLE

En esta etapa del proyecto, se explica en detalle la programación realizada para ambos programas. Se debe señalar que en el **ANEXO E** se encuentra a modo general, el flujo de programación de LATERAL PILES y de STATIC PILES.

### 4.2.1.- LATERAL PILES

Este programa calcula la deformación máxima y la distribución de reacciones en un pilote, producidas por una fuerza solicitante lateral aplicada en su extremo superior.

Este programa utiliza el método de elementos finitos para encontrar una matriz de rigidez  $KT$  global del sistema generada por la división del pilote en 10 nodos.



#### Propiedades del Pilote

Largo total del elemento

$L_1$   m

Longitud externa superior

$L_1$   m

Modulo de elasticidad

$E$    $KN/m^2$

Carga lateral

$P$    $KN$

Diámetro del pilote

$B$   m

Longitud de último elemento

$L_N$   m

Inercia del elemento

$I$    $m^4$

Desplazamiento máximo del pilote

$\delta$   m

Esta es la entrada de datos del programa correspondiente al pilote.

*Largo total del elemento:*

En esta ventana se debe ingresar el largo total en metros del pilote a analizar; esta medida puede ser modificada cuantas veces sea necesario hasta obtener los resultados que se desean encontrar

*Longitud externa superior:*

En esta ventana, se debe ingresar la longitud del pilote que quedara sobre la superficie del terreno, en caso que el pilote no sea enterrado completamente.

*Longitud del último elemento:*

En esta ventana, se debe ingresar la longitud de la última porción del pilote. Esta medida es para efecto de cálculos, por lo cual se puede ingresar el valor de “cero” si se desea.

*Diámetro del pilote:*

En esta ventana se debe ingresar el diámetro o ancho del pilote en metros.

*Modulo de elasticidad E:*

En esta ventana, se ingresa el modulo de elasticidad del elemento en kPa.

*Inercia del elemento:*

Se debe ingresar la inercia del pilote en unidades de  $m^4$

*Carga Lateral:*

En esta ventana, se debe ingresar el valor de la carga lateral solicitante en kN, la cual esta aplicada en la parte superior del pilote.

*Desplazamiento máximo del pilote:*

En esta ventana se ingresa el valor del desplazamiento máximo admisible que restringe al pilote en su parte superior.

Propiedades del Suelo

Propiedades índice Según tabla 1

Constantes según J.E. Bowles

Cohesion

$N_y$

$N_c$

$F_{w1}$

$C_m$

$c$

$N_q$

$F_{w2}$

$C$   kN/m<sup>3</sup>

Densidad del suelo

$\gamma$   kN/m<sup>3</sup>

Para modulo de rigidez horizontal del suelo constante ingresar su valor

$n$

kN/m<sup>3</sup>

→ TABLA 1—Factores de capacidad según Terzagui y Vesic

Esta etapa corresponde al ingreso de datos del suelo:

Propiedades Índice según tabla 1:

En estas ventanas, se deben ingresar estas propiedades, según el ángulo de fricción interna que se tenga, haciendo doble clic en la flecha correspondiente, aparece la tabla 1, tal como se muestra a continuación:

Bearing Capacity Factors						
$\Phi$	Terzaghi's (1943) Expression			Vesic's (1973, 1975) Expression		
	$N_c$	$N_q$	$N_y$	$N_c$	$N_q$	$N_y$
0	5.7	1	0	5.14	1	0
5	7.3	1.6	0.5	6.49	1.6	0.4
10	9.6	2.7	1.2	8.34	2.5	1.2
15	12.9	4.4	2.5	11	3.9	2.6
20	17.7	7.4	5	14.8	6.4	5.4
25	25.1	12.7	9.7	20.1	10.7	12.5
30	37.2	22.5	19.7	30.1	18.4	22.4
35	57.8	41.4	42.4	46.4	33.5	48.1
40	95.7	81.3	100	75.3	64.1	109.3
45	172	173	298	134	135	271.3

TABLA 4: Factores de capacidad de resistencia dados por Terzagui y Vesic

FUENTE: Elaboración Propia

Si el ángulo de fricción interna se encuentra entre estos valores, se debe tomar el intervalo correspondiente a  $\Phi$ , interpolando junto con los valores de  $N_c$ ,  $N_q$  o  $N_y$ , para encontrar los valores exactos.

*Constantes según J. E. Bowles:*

Estas constantes son recomendadas por J. E. Bowles, para el cálculo de pilotes sometidos a una carga lateral y fueron mencionadas anteriormente.

*Cohesión:*

En esta ventana se debe ingresar la cohesión del suelo en unidades de  $\text{kN/m}^2$ .

*Densidad del suelo:*

En esta ventana, se debe ingresar la densidad del suelo en unidades de  $\text{kN/m}^3$ .

*Rigidez horizontal kh:*

Se debe elegir en la ventana desplegable, si esta distribución de esfuerzos del suelo es constante o variable; si es variable, el programa ejecuta las fórmulas correspondientes para determinarlo, pero si es constante, se debe ingresar el valor de esta en la ventana adjunta en unidades de  $\text{kN/m}^3$ .

## Procedimiento de cálculo del programa

En la primera parte, el programa realiza el cálculo de la reacción horizontal del suelo kh, en caso que esta sea variable, utilizando el input de datos de la siguiente forma:

$$\mathbf{z} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..N \\ \quad \mathbf{aux}_i \leftarrow Z_i \\ \mathbf{aux} \end{array} \right. \quad \mathbf{Ah} := \mathbf{Fw1} \cdot \mathbf{Cm} \cdot \mathbf{C} \cdot [\mathbf{c} \cdot \mathbf{Nc} + (0.5) \cdot \gamma \cdot \mathbf{B} \cdot (\mathbf{Ny})]$$

$$\mathbf{Bh} := \mathbf{Fw2} \cdot \mathbf{Cm} \cdot \mathbf{C} \cdot \gamma \cdot \mathbf{Nq}$$

$$\mathbf{kh} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..N - 1 \\ \quad \mathbf{aux}_i \leftarrow \mathbf{Ah} + \mathbf{Bh} \cdot (\mathbf{z}^n)_i \\ \mathbf{aux} \end{array} \right.$$

Obteniendo la rigidez  $kh$  del suelo en forma de un vector y correspondiente a cada profundidad  $z_i$  del suelo

El programa continua realizando el cálculo de la distribución uniforme de rigidez del suelo en el pilote, según se indica a continuación:

$$\begin{array}{l}
 \underline{K} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..N - 1 \\ \quad \text{aux}_i \leftarrow Kh \\ \text{aux} \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \underline{KH} := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \text{Modulo} = 1 \\ \quad \text{aux} \leftarrow kh \\ \quad \text{aux} \\ \text{if } \text{Modulo} = 2 \\ \quad \text{aux} \leftarrow K \\ \quad \text{aux} \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \underline{Kt} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 2..N - 1 \\ \quad \text{aux}_i \leftarrow L_{i+1} \cdot B \cdot KH_i \\ \text{for } i \in 1 \\ \quad \text{aux}_i \leftarrow 0.5 \cdot L_i \cdot B \cdot KH_i \\ \text{aux} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Obteniéndose así el módulo de reacción de rigidez del pilote en cada nodo.

Luego, haciendo doble clic en la pestaña que sigue, se encuentran los valores de  $z$ ,  $kh$  y  $Kt$ , en forma de vectores columna

A continuación, el programa genera la matriz de rigidez global del sistema, tal como se indico anteriormente, uniendo los elementos del pilote, la cual se encuentra en el **ANEXO B**, debido a su tamaño.

En la ventana “KT=”, del programa, y haciendo doble clic, se puede apreciar la matriz de rigidez global del sistema, la cual es una matriz cuadrada de 22x22.

En la última área del programa, se realiza una subdivisión de la matriz global, para encontrar las soluciones del problema, en forma exacta.

El programa una vez que obtiene los valores de estas submatrices, realiza las siguientes operaciones para encontrar los resultados finales:

$$X2 := K22^{-1} \cdot (P2^T) \quad P1 := K12 \cdot K22^{-1} \cdot (P2^T) \quad P := K22 \cdot X2$$

En donde K22, K12, P2 y X2, corresponden a las submatrices mencionadas anteriormente.

Finalmente, el programa nos muestra los valores del desplazamiento máximo generado en la cabeza del pilote, del generado a nivel del suelo y el momento recuperador que genera la reacción del suelo, para posteriormente entregar los resultados en una imagen del problema, con los valores encontrados, junto con un gráfico que indica el módulo de reacción generado para el suelo en donde se analizó el pilote, tal como se indica en la Figura 10.

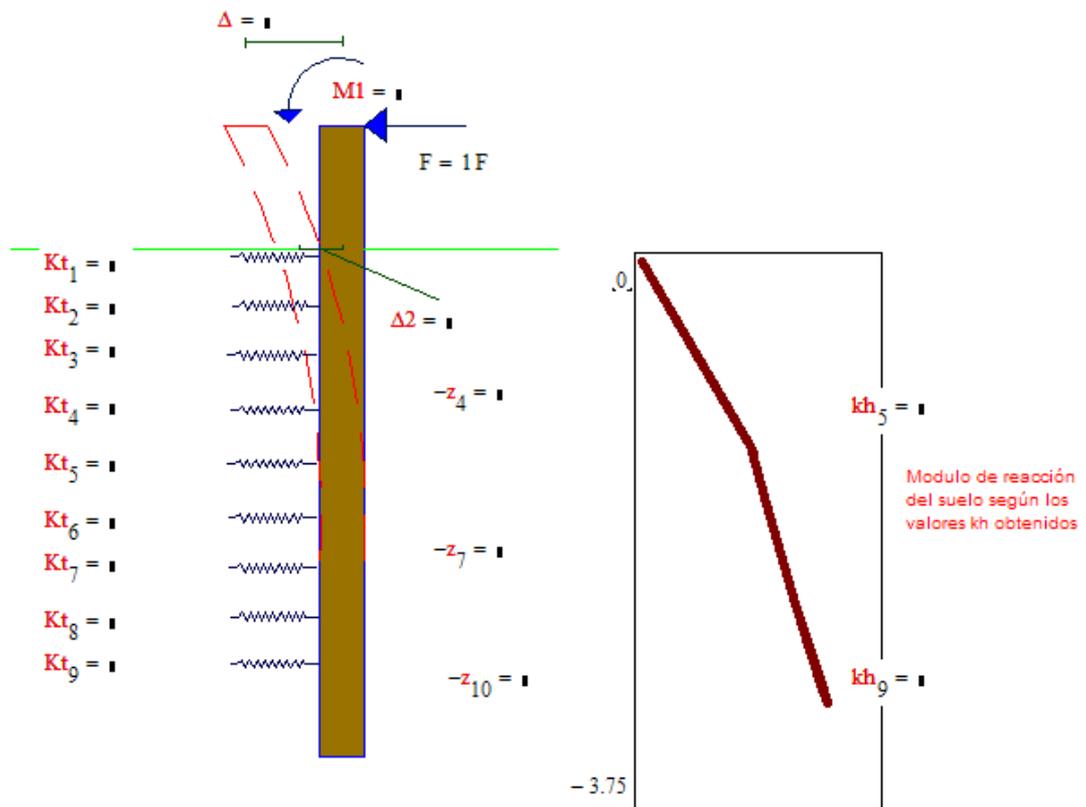
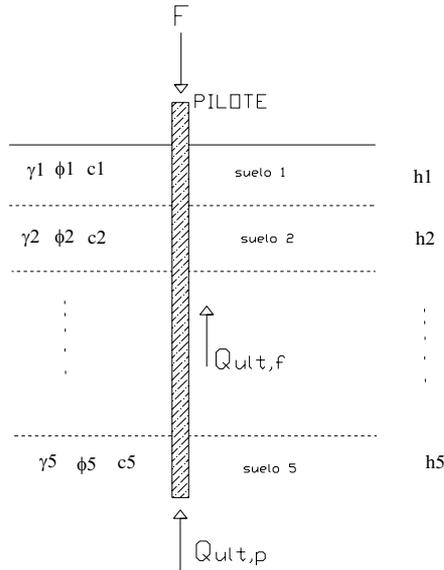


FIGURA 10: Distribución de esfuerzos y desplazamientos de un pilote cargado lateralmente  
FUENTE: Elaboración Propia

#### 4.2.2.- STATIC PILE

Este programa verifica el diseño de un pilote a través de la Capacidad Resistente por punta y por Fricción, para un suelo de hasta 10 capas, y una fuerza  $F$ .

En la primera parte se encuentra el ingreso de datos, correspondientes al pilote, tal como se indica a continuación:



##### Datos del Pilote

Material del pilote	Largo total del pilote	Solicitación axial del pilote	Si el pilote es de un perfil de acero se debe ingresar el área y el perímetro de la sección
Hormigon	L 30 m	F 30 ton	As 0 m <sup>2</sup>
Densidad del material	diametro del pilote	Factor de Seguridad	p 0 m
γ 2.4 ton/m <sup>3</sup>	d 0.30 m	3	
Sección del pilote	Capa de suelo hasta donde llega el pilote		
Cuadrado	2		

*Material de pilote:*

Esta ventana desplegable nos da tres opciones de selección, Hormigón, Madera y Acero, los cuales son los materiales que se utilizan para la fabricación de un pilote.

*Densidad del material:*

En esta ventana, se debe ingresar la densidad del material del cual esta fabricado el pilote, la cuál será utilizada por el programa para calcular el peso propio respectivo del pilote analizado.

#### *Largo total del pilote:*

En esta ventana, se debe ingresar el largo estimado del pilote, tantas veces sea necesario para que se cumplan todos los criterios de diseño que se explicarán mas adelante. Las unidades de longitud deben ser introducidas en metros.

#### *Diámetro del pilote:*

En esta ventana se debe ingresar el diámetro del pilote en caso que este sea de una sección circular, o el ancho en el caso que el pilote sea de sección cuadrada. Esta medida debe ser ingresada en metros.

#### *Sección del pilote:*

En esta ventana desplegable, se indican dos opciones, que señalan la sección del pilote que se esta analizando, ya sea de sección cuadrada o circular.

#### *Capa de Suelo hasta donde llega el Pilote:*

En esta ventana, se debe ingresar la capa a la cuál se estima que llegará el pilote que se está verificando.

#### *Solicitud axial del pilote:*

En esta ventana se ingresa el valor de la fuerza axial solicitante aplicada en la cabeza del pilote, la cuál deberá ser ingresada en toneladas-fuerza.

#### *Factor de seguridad:*

Este factor de seguridad es utilizado para mayorar conservadoramente la carga axial solicitante del pilote.

#### *As y P:*

En el caso que el pilote analizado sea del material de acero, teniendo en cuenta que su sección puede variar de doble ángulo, doble T, etc., se debe ingresar en la ventana "As" el área de la sección del pilote, y en la ventana "P", se debe ingresar su perímetro.

En la segunda parte se encuentra el ingreso de datos, correspondientes al tipo de suelo en donde se instalaran los pilotes, tal como se indica a continuación:

**Datos del suelo**

Nº de capas del suelo

Ver tabla 1 (valores recomendados)  
Valores correspondientes al ángulo de fricción interna de la última capa del suelo

Nc

Nq

→ [Tabla 1](#)

*Nº de capas del suelo:*

En esta ventana desplegable, se debe seleccionar el número de capas que entrega la estatigrafía del suelo, las que para efectos de diseño del programa se selecciona de 1 a 10 capas.

*Nc y Nq:*

Estos son propiedades índice de la última capa del suelo, y estas dependen del ángulo de fricción interna de la última capa del suelo. Estos valores recomendados por Vesic, se encuentran haciendo doble clic en la pestaña que corresponde, en donde aparece la siguiente tabla:

TABLA 1

N*c y N*q Según Vesic		
Φ	N*c	N*q
0	6.97	1
5	8.99	1.79
10	11.55	3.04
20	18.83	7.85
30	30.03	18.34
35	37.65	27.36
40	47.04	40.47
45	53.66	59.66

Si el ángulo de fricción interna se encuentra entre estos valores, se debe tomar el intervalo correspondiente a  $\phi$ , interpolando junto con los valores de Nc y Nq para encontrar los valores exactos.

TABLA 5: Factores de capacidad de resistencia dados por Vesic  
FUENTE: Elaboración Propia

El valor de Nc, también puede ser calculado en términos de Nq, según la siguiente fórmula entregada por vesic:

$$Nc' := \frac{Nq - 1}{\tan\left[\left(0.01745\phi\right)_2\right]}$$

Valor que debe ser ingresado en el casillero correspondiente a  $N_c$ , si es que no se cuenta con este valor y se desea aplicar otro criterio.

### Ingreso de estatigrafía:

Se debe hacer doble clic en la pestaña correspondiente y aparecerá el ingreso de datos. En esta sección del programa, se deben ingresar las características de cada capa del suelo, su altura  $h_i$ , su ángulo de fricción interna  $\Phi$ , su cohesión  $C$  en  $\text{kg/cm}^2$ , su densidad en  $\text{T/m}^3$ , y se debe seleccionar el tipo de suelo al que corresponde en la ventana desplegable de la derecha, en donde se elige entre suelo fino (arcilla) y suelo granular (arena), tal como se muestra a continuación:

Altura de Capas del suelo en m.	Angulo de fricción interna.	Cohesión del suelo en $\text{kg/cm}^2$	Densidad del suelo en $\text{T/m}^3$	Tipo de suelo en cada capa
$h_1$ 3	$\phi_1$ 10	$c_1$ 0.15	$\gamma_1$ 1.4	Fino (arcilla)
$h_2$ 5	$\phi_2$ 18	$c_2$ 0.10	$\gamma_2$ 1.65	Fino (arcilla)
$h_3$ 21.2	$\phi_3$ 30	$c_3$ 0	$\gamma_3$ 1.8	Granular (arena)
$h_4$ 0	$\phi_4$ 0	$c_4$ 0	$\gamma_4$ 0	Granular (arena)
$h_5$ 0	$\phi_5$ 0	$c_5$ 0	$\gamma_5$ 0	Granular (arena)
$h_6$ 0	$\phi_6$ 0	$c_6$ 0	$\gamma_6$ 0	Granular (arena)
$h_7$ 0	$\phi_7$ 0	$c_7$ 0	$\gamma_7$ 0	Granular (arena)
$h_8$ 0	$\phi_8$ 0	$c_8$ 0	$\gamma_8$ 0	Granular (arena)
$h_9$ 0	$\phi_9$ 0	$c_9$ 0	$\gamma_9$ 0	Granular (arena)
$h_{10}$ 0	$\phi_{10}$ 0	$c_{10}$ 0	$\gamma_{10}$ 0	Granular (arena)

Este programa considera cada capa o estrato de suelo como saturada, por lo que automáticamente STATIC PILES considera la densidad del suelo menos la densidad del agua.

Si la densidad de alguna de las capas ingresadas no esta saturada, se le debe agregar la densidad que se descuenta:

Si la densidad de una capa es  $1,8 \text{ t/m}^3$ , y esta no se encuentra saturada, se debe ingresar el valor de  $1,8 + 1 \text{ t/m}^3$ , o sea  $2,8 \text{ t/m}^3$ .

A continuación comienza la etapa de cálculo y entrega de datos del programa, en donde se comienza con el cálculo de la Capacidad de soporte por punta del pilote:

### Cálculo de la sección y del perímetro del pilote

```

Ap := if Sección = 1
      if Material = 1
        aux ← d2
        aux
      if Material = 2
        aux ← d2
        aux
      if Material = 3
        aux ← As
        aux
    if Sección = 2
      if Material = 1
        aux ← π · (d2/4)
        aux
      if Material = 2
        aux ← π · (d2/4)
        aux
      if Material = 3
        aux ← As
        aux
    return aux

P := if Sección = 1
     if Material = 1
       aux ← 4 · d
       aux
     if Material = 2
       aux ← 4 · d
       aux
     if Material = 3
       aux ← p
       aux
   if Sección = 2
     if Material = 11 + 2KoN
       η := (d/2)3
       aux ← 2 · π · η
       aux
     if Material = 2
       aux ← 2 · π · (d/2)
       aux
     if Material = 3
       aux ← p
       aux
   return aux
  
```

### Esfuerzo vertical efectivo

$$q := \sum_{i=1}^N [(\gamma_i - 1) \cdot h_i]$$

```

Ko := | for i ∈ 1.. N
      | if Si = 1
      |   | aux1 ← 1 - sin(r·φi)
      |   | aux
      | for i ∈ 1.. N
      | if Si = 2
      |   | aux1 ← 0.95 - sin(r·φi)
      |   | aux
      | aux
      Qult_p := Ap·(cN·Nc + η·q·Nq)

```

Esta parte del programa se encuentra bloqueada, para evitar modificaciones o alteraciones por parte de terceros, por lo cuál solamente se entrega el valor final del esfuerzo vertical efectivo y la capacidad de soporte por punta:

**q** en T/m<sup>2</sup> y **Qult\_p** en Ton.

A continuación se indica la parte del programa que realiza el cálculo de la capacidad de soporte por fricción lateral del pilote. Se debe señalar que esta ventana se encuentra bloqueada por las razones explicadas anteriormente:

Cálculo de la capacidad de soporte por fricción lateral:

$Z_1 := h_1$	$\sigma_{v1} := (\gamma_1 - 1) \cdot h_1$	<pre> ρ :=   for i ∈ 1.. N         if S<sub>i</sub> = 1             aux<sub>1</sub> ← <math>\frac{2 \cdot r \cdot \phi_i}{3}</math>             aux         for i ∈ 1.. N         if S<sub>i</sub> = 2             aux<sub>1</sub> ← r·φ<sub>i</sub>             aux         return aux </pre>
$Z_2 := h_1 + h_2$	$\sigma_{v2} := (\gamma_2 - 1)h_2 + \sigma_{v1}$	
$Z_3 := h_3 + Z_2$	$\sigma_{v3} := (\gamma_3 - 1) \cdot h_3 + \sigma_{v2}$	
$Z_4 := h_4 + Z_3$	$\sigma_{v4} := (\gamma_4 - 1) \cdot h_4 + \sigma_{v3}$	
$Z_5 := h_5 + Z_4$	$\sigma_{v5} := (\gamma_5 - 1) \cdot h_5 + \sigma_{v4}$	
$Z_6 := h_6 + Z_5$	$\sigma_{v6} := (\gamma_6 - 1) \cdot h_6 + \sigma_{v5}$	
$Z_7 := h_7 + Z_6$	$\sigma_{v7} := (\gamma_7 - 1) \cdot h_7 + \sigma_{v6}$	
$Z_8 := h_8 + Z_7$	$\sigma_{v8} := (\gamma_8 - 1) \cdot h_8 + \sigma_{v7}$	
$Z_9 := h_9 + Z_8$	$\sigma_{v9} := (\gamma_9 - 1) \cdot h_9 + \sigma_{v8}$	
$Z_{10} := h_{10} + Z_9$	$\sigma_{v10} := (\gamma_{10} - 1) \cdot h_{10} + \sigma_{v9}$	

$Z_t :=$	$\sigma'_t :=$
for i ∈ 1.. N	for i ∈ 1.. N
aux <sub>1</sub> ← Z <sub>i</sub>	aux <sub>1</sub> ← σ <sub>v</sub> <sub>i</sub>
aux	aux

$$\sigma H := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \text{aux}_i \leftarrow K o_i \cdot \sigma V_i \\ \text{aux} \end{cases}$$

$$\sigma V := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \text{aux}_i \leftarrow \frac{\sigma v'_i + \sigma v'_{i-1}}{2} \\ \text{aux} \end{cases}$$

$$Qult\_f := \sum_{i=1}^N Qult_i$$

$$\tau := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \text{aux}_i \leftarrow \sigma H_i \cdot \tan(\rho_i) \\ \text{aux} \end{cases}$$

$$Qult := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \text{aux}_i \leftarrow \tau_i \cdot P \cdot h_i \\ \text{aux} \end{cases}$$

En donde estos son los algoritmos programados para realizar el cálculo correspondiente a esta etapa y los cuales fueron explicados anteriormente.

Se debe señalar que al hacer doble clic en la pestaña:

[→ Valores finales para la determinación de la capacidad de soporte por fricción](#)

Se pueden ver los valores generados por los algoritmos a modo de vectores columna, y en donde finalmente se entrega el valor final de la capacidad de soporte por fricción lateral:

**Qult\_f**

En la última etapa del programa se realiza el cálculo del peso propio del pilote y de la resistencia última total del pilote "Qult\_t", la que se compara con la carga axial solicitante multiplicada por el factor de seguridad ingresado, en donde finalmente se debe cumplir el siguiente criterio:

**Qult\_f > Qsol\_may → "Ok"**

**Qult\_f < Qsol\_may → "Se debe redimensionar el pilote"**

La gracia del programa es que los datos se pueden ir iterando rápidamente al ingresarlos, debido a que el programa entrega los valores y criterios de diseño en forma inmediata.

Los programas finales creados se pueden ver gráficamente en el **ANEXO D**, o se pueden ver directamente al abrir el archivo correspondiente a los programas que se encuentran anexos en el CD de este proyecto.

Cabe señalar, que para abrir los programas, es necesario tener en el ordenador instalado MATHCAD13, o alguna versión más nueva que esta.

# **CAPITULO V**

## **ANALISIS DE RESULTADOS**

## 5.1.- COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la validación de los resultados obtenidos, los programas creados se probaron con problemas dados, cuyos resultados pueden ser comparados con los resultados generados, aplicando dichos problemas a "LATERAL PILES" y A "STATIC PILES".

### 5.1.1.- LATERAL PILES

Para la verificación de este programa, se utilizaron dos problemas encontrados en el libro "The Foundation Engineering" del autor Manjriker Gunaratne (2006), en el capítulo 8, pág. 345, 346, 347 y 348, los cuales se explican a continuación, seguido de la revisión correspondiente del programa.

#### 5.1.1.1.- Problema 1:

Determinar la rigidez elástica del suelo, de un pilote de 300x300 mm. de sección, de largo 4.75 m. Asumir que la corrección proveniente del test de penetración estándar (STP), evaluando la sobrecarga en una capa de arena, es 15 y 16,5 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

#### Desarrollo:

Para N=15, se determina un ángulo de fricción interna  $\Phi = 34^\circ$  (La obtención de este valor, se encuentra explicado en el **ANEXO C** de este proyecto), y según la TABLA 3.1 (TABLA 1 de este proyecto), los factores de capacidad de carga son:  $N_c = 42$ ,  $N_q = 29$  y  $N_\gamma = 29$ .

Ocupando los factores definidos por Bowles (1996) y aplicando las ecuaciones 8.28 del texto, se tiene lo siguiente:

$$A_h = F_{w1} * C_m * C(c * N_c + 0.5\gamma B * N_\gamma) = (1.0)(1.5)(40)(0.5) * (16.5)(0.3)(29) = 4306,5$$

$$B_h = F_{w2} * C_m * C * \gamma * N_q = 1.0(1.5)(40)(16.5)(29) = 28710$$

Finalmente, aplicando:  $k_h = A_h + B_h * Z^n$ , se tiene:

$$k_h = 4307 + 28710Z^{0.5}$$

Esta es la rigidez del suelo encontrada para el pilote dado. Su distribución se muestra en la siguiente figura:

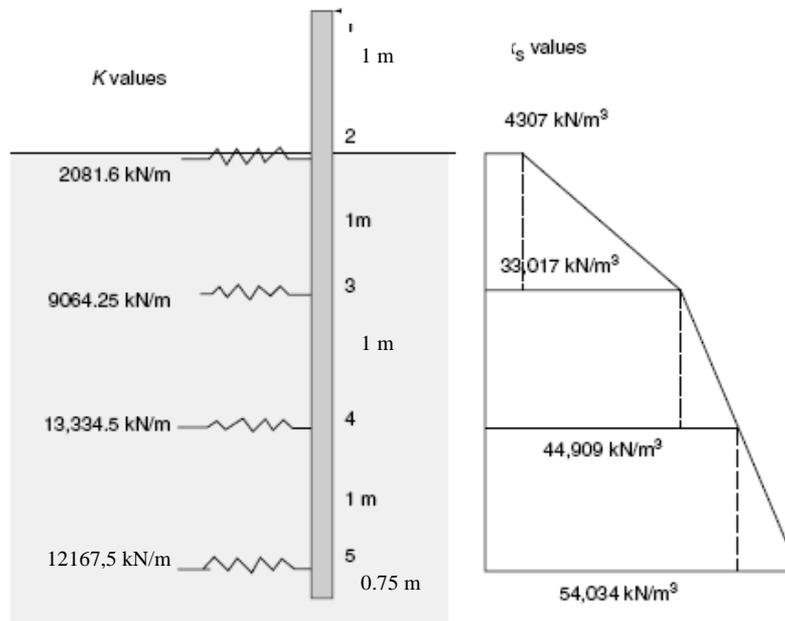


FIGURE 8.15  
Illustration for Example 8.3.

Figura 11: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente

FUENTE: Gunaratne (2006)

En donde la rigidez aplicada al pilote se obtiene de las siguientes ecuaciones.

$$K_j = LBk_h \quad \text{para nudos profundos}$$

$$K_j = 0.5LBk_h \quad \text{para el nudo mas superficial (nudo 2)}$$

### 5.1.1.2.- Problema 1 aplicado a LATERAL PILES:

Anibal Meza P  
Ing. Civil en Obras Civiles

## LATERAL PILES

Este programa calcula la deformación máxima y la distribución de reacciones en un pilote, producida por una fuerza solicitante lateral aplicada en su extremo superior. Este programa utiliza el método de elementos finitos para encontrar una matriz de rigidez KT global del sistema generada por la división del pilote en 10 nodos.

Tomando en consideración la entrada de datos correspondiente a las propiedades del suelo en el programa, ocupando los datos entregados en el "Problema 1" y seleccionando la distribución de rigidez kh como variable en la ventana inferior, se tiene:

#### Propiedades del Pilote

largo total del elemento  $L_1$   m      longitud externa superior  $L_1$   m      modulo de elasticidad E  KPa      Carga lateral P  KN

Diametro del pilote B  m      longitud de último elemento  $L_N$   m      Inercia del elemento I  m<sup>4</sup>      Desplazamiento máximo del pilote  $\delta$   m

#### Propiedades del Suelo

Propiedades indice Según tabla 1      Constantes según J.E. Bowles      Cohesion

$N_\gamma$         $N_c$        Fw1       Cm       c

$N_q$        Fw2       C  KN/m<sup>3</sup>      Densidad del suelo  $\gamma$   KN/m<sup>3</sup>

Para modulo de rigidez horizontal del suelo constante ingresar su valor      n

Variable   $kh$   kN/m<sup>3</sup>

Al hacer doble clic en la flecha que señala "Valores Z, kh y Kt", se despliegan en forma de vectores columna los resultados. Cabe indicar que "LATERAL PILES" divide automáticamente el pilote dado en 10 subelementos, por tanto se tiene:

→Valores Z, kh y Kt:

Profundidad de cada nodo en m	Módulo de reacción del suelo en cada nodo	Módulo de reacción del Pilote en cada nodo
$z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.375 \\ 0.75 \\ 1.125 \\ 1.5 \\ 1.875 \\ 2.25 \\ 2.625 \\ 3 \\ 3.75 \end{pmatrix} m$	$kh = \begin{pmatrix} 4306.5 \\ 21887.713 \\ 29170.089 \\ 34758.054 \\ 39468.925 \\ 43619.287 \\ 47371.5 \\ 50822.016 \\ 54033.679 \end{pmatrix} kN/m^3$	$Kt = \begin{pmatrix} 645.975 \\ 2462.368 \\ 3281.635 \\ 3910.281 \\ 4440.254 \\ 4907.17 \\ 5329.294 \\ 5717.477 \\ 12157.579 \end{pmatrix} kNm$

En donde se puede ver la distribución gráficamente al final del programa, en donde se visualizan algunos valores de kh:

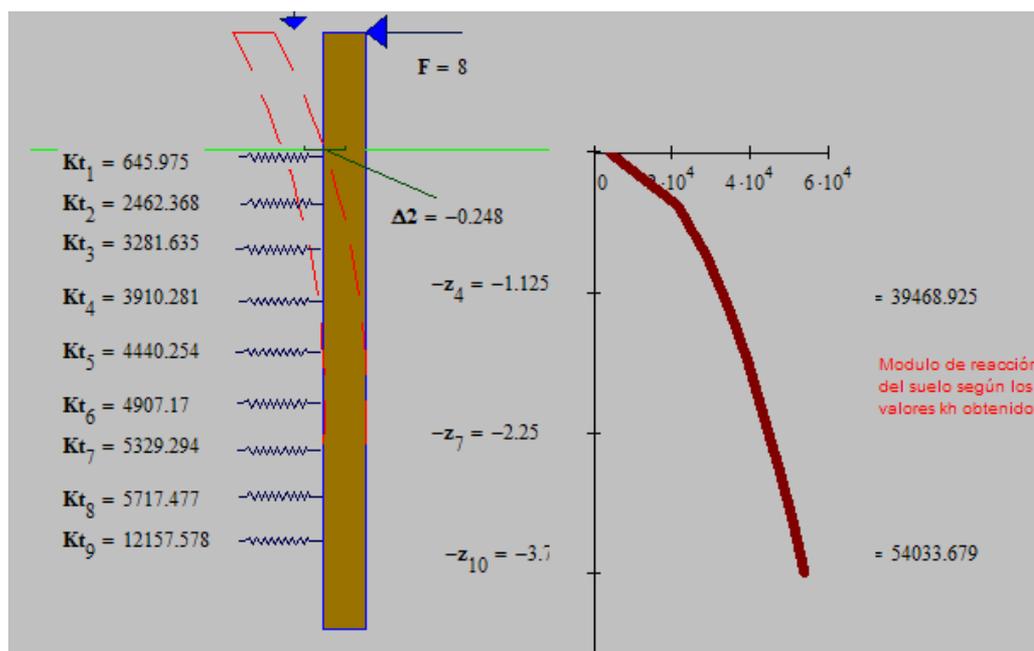


Figura 12: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente  
FUENTE: Elaboración propia

Según los valores obtenidos, se puede apreciar la semejanza del gráfico con la distribución de la rigidez del suelo, además de los valores de distribución de rigideces  $kh$  y  $Kt$ .

**5.1.1.3.- Problema 2:**

Un Pilote confeccionado de un perfil de acero de 300 mm de ancho, perteneciente a un grupo de pilotes, es solicitado en su extremo superior, por una carga lateral de 8 kN, generando un momento recuperador en su extremo superior restringiendo la rotación. El coeficiente de rigidez horizontal del suelo es constante, no varia según la profundidad, y su valor es de 1000 kN/m<sup>3</sup>. Determine la rigidez del elemento, su deflexión lateral (desplazamiento) y su esfuerzo recuperador, para 6 nodos. La inercia de la sección es de 2.2x10<sup>-6</sup> m<sup>4</sup> y el modulo elástico del acero es de 2.0x10<sup>6</sup> kPa.

**Desarrollo:**

Aplicando la metodología de cálculo para encontrar kh y Kt, considerando que kh es constante, se obtiene:

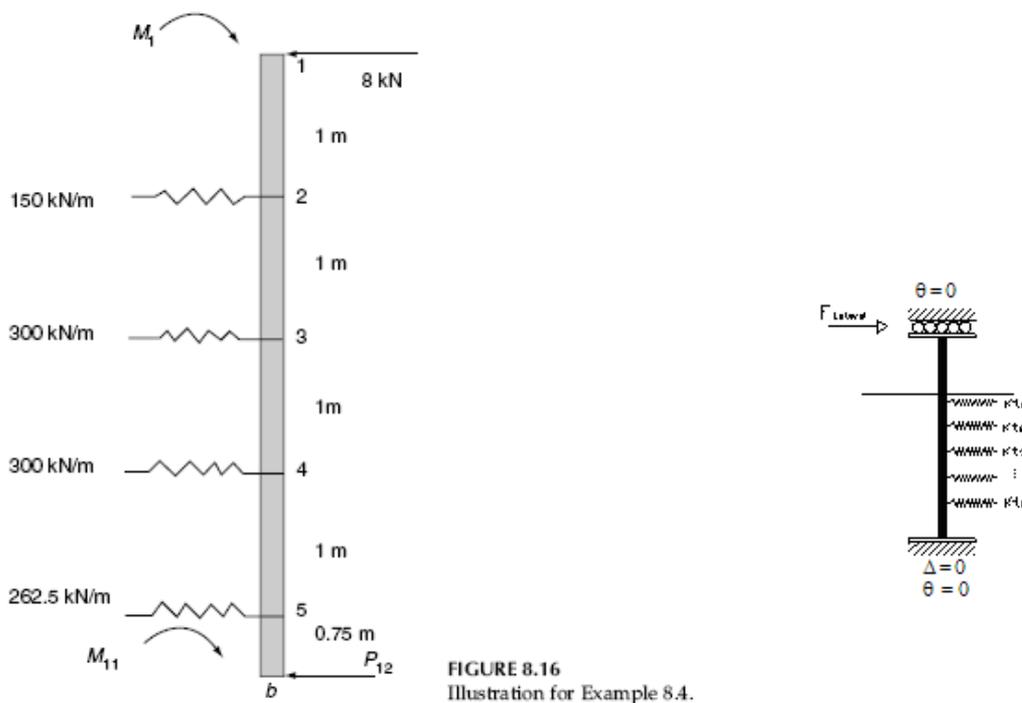


Figura 13: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente  
FUENTE: Gunaratne (2006)

En donde se pueden apreciar las rigideces del elemento en cada nodo.

Realizando el análisis de esfuerzos y reacciones, se obtiene el siguiente vector de esfuerzos:

$$P = [M_1 \quad 8 \quad 0 \quad M_{11} \quad P_{12}]^T$$



En donde se tiene que  $K_{11}$  es del orden de  $3 \times 3$ ,  $K_{12}$ , del orden de  $3 \times 9$ ,  $K_{21}$  del orden de  $9 \times 3$  y  $K_{22}$ , del orden de  $9 \times 9$ , redefiniendo a su vez los vectores correspondientes a  $P$  y  $X$ , de la siguiente forma:

$$P_1 = [M_1 \quad M_{11} \quad P_{12}]^T$$

$$P_2 = [8 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$X_1 = [0 \quad 0 \quad 0] = 0$$

$$X_2 = [\Delta \quad \theta_2 \quad \Delta_2 \quad \theta_3 \quad \Delta_3 \quad \theta_4 \quad \Delta_4 \quad \theta_5 \quad \Delta_5]$$

En donde se forman subsistemas lineales, cuya solución se encuentra de la siguiente forma:

$$[P]_1 = [K]_{11}[X]_{11} + [K]_{12}[X]_2$$

$$[P]_2 = [K]_{21}[X]_1 + [K]_{22}[X]_2$$

En donde el vector  $X_2$  queda de la siguiente forma:

$$[X]_2 = -[K]_{21}[X]_1 + [K]_{22}^{-1}[P]_2 = [K]_{22}^{-1}[P]_2$$

Y el vector  $P_1$  se redefine como:

$$[P]_1 = [K]_{12}[K]_{22}^{-1}[P]_2$$

En el texto, señalan la utilización de un programa computacional para resolver estos sistemas, los cuales arrojan los siguientes resultados:

Del vector  $X_2$ , se obtiene el desplazamiento lateral superior que sufre el pilote, cuyo valor es  $\Delta = 0.304 \text{ m}$ .

De la misma manera, del vector  $P_1$ , se obtiene el momento superior generado por la acción del suelo en el pilote, a través de la distribución de resortes, cuyas rigideces se mencionaron anteriormente por el vector  $K_t$ .

El valor del momento requerido para refrenar el giro es  **$M_1 = 16 \text{ kNm}$** .

Estos son los resultados del ejemplo estudiado en el texto.

A continuación, se realiza la ejecución de LATERAL PILES para comparar sus resultados.

### 5.1.1.4.- Problema 2 aplicado a LATERAL PILES

Introduciendo los datos del Problema 2 a LATERAL PILES, teniendo en cuenta que la longitud del pilote que se encuentra sobre el terreno es de 1 metro, y su última longitud es de 0,75 m, además de definir el módulo de rigidez del suelo como constante e introduciendo su valor, se tiene:

Anibal Meza P  
Ing. Civil en Obras Civiles

## LATERAL PILES

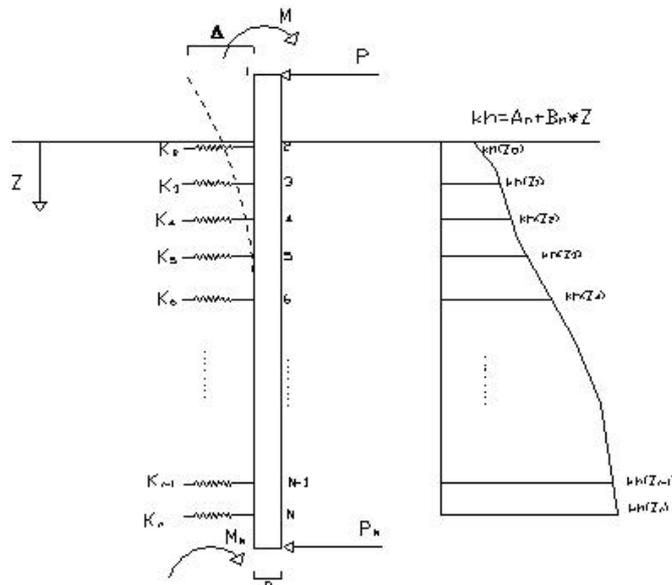
Este programa calcula la deformación máxima y la distribución de reacciones en un pilote, producida por una fuerza solicitante lateral aplicada en su extremo superior.  
Este programa utiliza el método de elementos finitos para encontrar una matriz de rigidez KT global del sistema generada por la división del pilote en 10 nodos.

#### Propiedades del Pilote

largo total del elemento	longitud externa superior	modulo de elasticidad	Carga lateral
$L_t$ <input type="text" value="4.75"/> m	$L_1$ <input type="text" value="1"/> m	$E$ <input type="text" value="2000000"/> $KPa$	$P$ <input type="text" value="8"/> $KN$
Diametro del pilote	longitud de último elemento	Inercia del elemento	Desplazamiento máximo del pilote
$B$ <input type="text" value="0.3"/> m	$L_N$ <input type="text" value="0.75"/> m	$I$ <input type="text" value="0.0000022"/> $m^4$	$\delta$ <input type="text" value="0.35"/> m

#### Propiedades del Suelo

Propiedades índice Según tabla 1		Constantes según J.E. Bowles		Cohesion
$N_\gamma$ <input type="text" value="29"/>	$N_c$ <input type="text" value="42"/>	$Fw1$ <input type="text" value="1"/>	$Cm$ <input type="text" value="1.5"/>	$c$ <input type="text" value="0"/>
$N_q$ <input type="text" value="29"/>		$Fw2$ <input type="text" value="1"/>	$C$ <input type="text" value="40"/> $KN/m^3$	Densidad del suelo
		$n$ <input type="text" value="0.5"/>		$\gamma$ <input type="text" value="16.5"/> $KN/m^3$
Para modulo de rigidez horizontal del suelo constante ingresar su valor				
<input type="text" value="Constante"/> $kh$ <input type="text" value="1000"/> $kN/m^3$				



En donde las constantes según J. E. Bowles son ignoradas por el programa debido a que la rigidez del suelo es constante y no se necesita obtener, y se agrega un desplazamiento máximo opcional, que no influye en los cálculos, solo en el criterio de desplazamiento.

El programa al estar generado para 10 nodos, subdivide automáticamente el pilote, entregándonos los siguientes resultados:

Profundidad de cada nodo en m	Módulo de reacción del suelo en cada nodo	Módulo de reacción del Pilote en cada nodo
$z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.375 \\ 0.75 \\ 1.125 \\ 1.5 \\ 1.875 \\ 2.25 \\ 2.625 \\ 3 \\ 3.75 \end{pmatrix}$ m	$kh = \begin{pmatrix} 4306.5 \\ 21887.713 \\ 29170.089 \\ 34758.054 \\ 39468.925 \\ 43619.287 \\ 47371.5 \\ 50822.016 \\ 54033.679 \end{pmatrix}$ kN/m <sup>3</sup>	$Kt = \begin{pmatrix} 150 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 112.5 \\ 225 \end{pmatrix}$ kN/m

En donde los valores de Kt que son generados por kh, son similares a los entregados en el Problema 2 (5.1.1.3).

La matriz de rigidez global KT generada por el programa para este pilote, considerando 10 nodos por el programa, es la siguiente:



En la cuál se pueden observar valores similares a los generados por el Problema 2 del texto.

A continuación, el programa realiza los cálculos de los vectores, entregándonos los siguientes resultados:

$\Delta = 0.30303 \text{ m}$	Desplazamiento generado en la cabeza superior del pilote
$\Delta 2 = 0.0524 \text{ m}$	Desplazamiento del pilote a nivel del terreno
$M1 = 16 \text{ kN}\cdot\text{m}$	Momento recuperador generado en la cabeza superior del pilote
<b>Desplazamiento "Ok"</b>	Si el desplazamiento no cumple, se debe redimensionar el pilote hasta que su desplazamiento máximo generado por la fuerza solicitante F, sea menor que su desplazamiento máximo $\delta$ .

Los cuales se pueden apreciar en la siguiente figura que se incluye al final del programa:

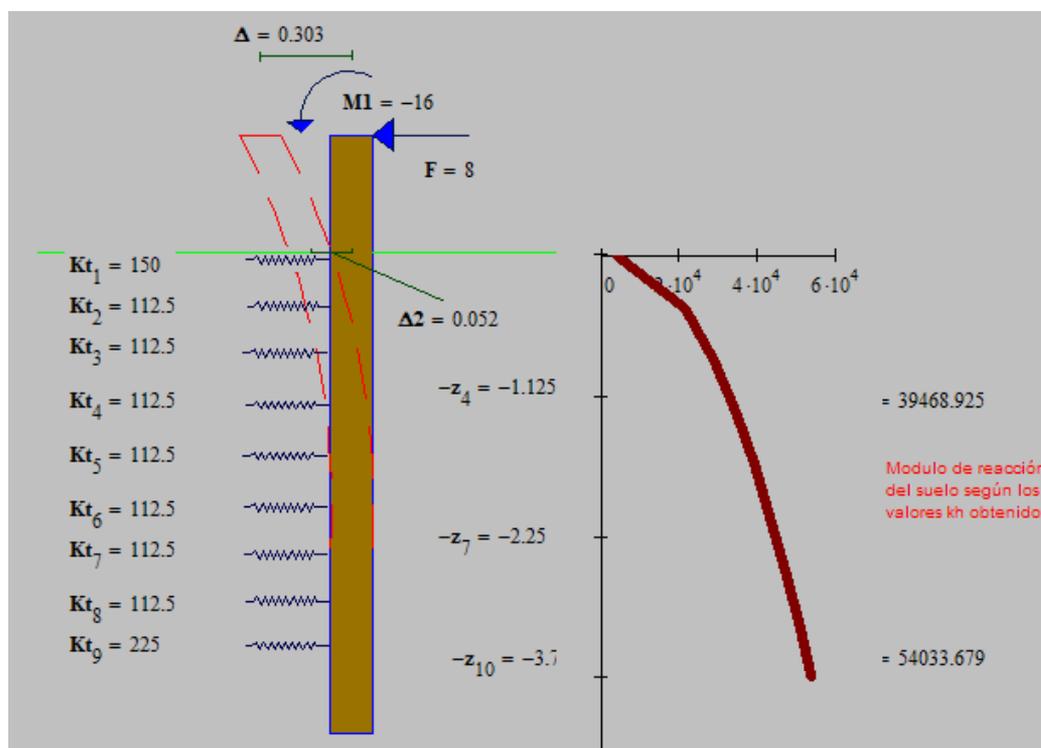


Figura 14: Distribución de esfuerzos y rigideces de un pilote Cargado lateralmente (Programa)

Fuente: Elaboración propia

Cuyo desplazamiento  $\Delta$  y momento  $M_1$  son de igual valor que el ejemplo estudiado en el texto indicado.

## 5.1.2.- STATIC PILES

Para la verificación de los resultados obtenidos por STATIC PILES, se consideró la estatigrafía realizada en la ciudad de Valdivia, en la ubicación del ex – Hotel Pedro de Valdivia, en donde se encuentra en marcha la construcción de un Casino de juegos y hotel para la ciudad.

Los datos y la información, fueron obtenidos de la memoria de cálculo y diseño de fundaciones del proyecto, facilitado por el profesor patrocinante.

La verificación de los resultados se realizó directamente con el Profesor patrocinante, la cuál será mencionada como “Problema 1”.

### 5.1.2.1.- Problema 1:

En la estatigrafía realizada para el proyecto del casino de juegos de la ciudad de Valdivia, se realizaron diversos sondajes de muestreo, en donde se obtuvieron 5 horizontes o capas de suelo, determinándose del estudio de mecánica de suelos, el uso de pilotes de hormigón armado preexcavados y además, que los horizontes H3 y H4 son capaces de entregar la Resistencia por Punta a los pilotes.

Debido a la profundidad de excavación realizada de 14,5 m. para encontrar el sello de fundación, se consideran el “horizonte 2” como primera capa de profundidad para los pilotes.

Los datos obtenidos del estudio de mecánica de suelos que se entregan a continuación, corresponden al primer sondaje realizado, y fueron los siguientes:

CAPA	Altura de Capa	fricción interna	Cohesión	Densidad	Tipo de Suelo
	h		C	$\gamma$	
	m	$\phi$	kg/cm <sup>2</sup>	T/m <sup>3</sup>	
1	13,7	21,8	0,1	1,663	Limo, arena limosa
2	2,2	32	0	1,853	Arena fina, limosa
3	5,75	38	0	2,085	Granular (arena)
4	13.85	24,9	0,16	1,673	Granular (arena)

Tabla 6: Valores entregados por el estudio de mecánica de suelos realizada al ex – Hotel Pedro de Valdivia para el emplazamiento del nuevo casino.

Fuente: Elaboración Propia.

Las densidades de las capas se encuentran saturadas, por lo cual se denominan las densidades como sumergidas.

De la memoria de cálculo, se concluye que uno de los largos de los pilotes será de 13,4 m, y se realizarán iteraciones para la determinación del diámetro de estos, que irán entre los 60, 80, 100 y 110 cm.

El análisis de los datos por parte del Profesor guía, para determinar la capacidad de soporte total de un pilote cargado axialmente entrego la siguiente tabla de resultados. Cabe mencionar que para efectos prácticos de interpretación de datos, este análisis se realiza por cada un metro de profundidad:

**Cálculo de la Capacidad total de soporte de un pilote**

Profundidad	Ko	Nsigma	Nc	Qult,p	TAU	Qult,f	Qult,f	Qult
m				ton	ult	i	ton	ton
1	0,5786	10	22,501	25,15	0,099	0,313	0,312	25,46
2	0,5786	10	22,501	28,89	0,198	0,624	0,937	29,83
3	0,5786	10	22,501	32,63	0,298	0,937	1,874	34,51
4	0,5786	10	22,501	36,38	0,397	1,249	3,122	39,50
5	0,5786	10	22,501	40,12	0,497	1,561	4,684	44,80
6	0,5786	10	22,501	43,86	0,596	1,874	6,558	50,42
7	0,5786	10	22,501	47,60	0,696	2,186	8,744	56,35
8	0,5786	10	22,501	51,35	0,795	2,498	11,242	62,59
9	0,5786	10	22,501	55,09	0,895	2,811	14,052	69,14
10	0,5786	10	22,501	58,83	0,994	3,123	17,175	76,00
11	0,5786	10	22,501	62,57	1,094	3,435	20,612	83,18
12	0,5786	10	22,501	66,32	1,193	3,747	24,358	90,67
13	0,5786	10	22,501	136,83	1,293	4,059	28,417	165,24
14	0,5786	30	46,41	149,15	1,554	4,879	33,297	182,44
15	0,5786	30	46,41	161,47	1,693	5,319	38,616	200,08

Tabla 7: Cálculo de la capacidad total de soporte de un pilote realizado por el profesor guía

Fuente: Elaboración Propia.

De la Tabla 7 correspondiente al cálculo de la capacidad de soporte de un pilote realizado por el profesor guía, y tomando en cuenta la profundidad del pilote, el cuál se encuentra entre las profundidades de 13, 14 m, y la profundidad de 13,4, que es la profundidad del pilote, interpolando, se tiene:

<b>Profundidad</b>	<b>Qult,f</b>	<b>Qult,p</b>	<b>Qult</b>
13	136,83	28,42	165,24
13,4	141,76	30,37	172,12
14	149,15	33,297	182,44

**Tabla 8: Interpolación realizada para encontrar los valores exactos correspondientes a la profundidad de 13,4 m**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

A continuación, se realiza la obtención de los datos obtenidos por “STATIC PILES”, aplicados a estos datos, para luego realizar la comparación respectiva.

### 5.1.2.2.- Problema 1 aplicado a STATIC PILES:

Se realiza el ingreso de datos correspondientes al punto 5.1.2.1 Problema 1 a STATIC PILES, en donde se tiene:

**Aníbal Meza Pérez**  
Ing. Civil en Obras Civiles

## STATIC PILES

Este programa Verifica el diseño de un pilote a través de la Capacidad Resistente por punta y por fricción lateral, para un suelo de hasta 10 capas, y una fuerza axial solicitante F, tal como se indica en la figura.

Se deben ingresar los datos que se piden a continuación, seleccionando el número de capas para luego agregar la estatigrafía correspondiente a las capas del suelo

#### Datos del Pilote

Material del pilote	Largo total del pilote	Solicitación axial del pilote	Si el pilote es de un perfil de acero se debe ingresar el área y el perímetro de la sección
Hormigon	L 13.4 m	F 50 ton	
Densidad del material	diametro del pilote	Factor de Seguridad	As 0 m <sup>2</sup>
γ 2.4 ton/m <sup>3</sup>	d 1 m	3	p 0 m
Sección del pilote	Capa de suelo hasta donde llega el pilote		
Circular	2		

#### Datos del suelo

Nº de capas del suelo	Ver tabla 1 (valores recomendados) Valores correspondientes al angulo de fricción interna de la última capa del suelo	Nq 10	Nc 14.406	Nc debe ser Según tabla 1 o calculado en términos de Nq
4				

El valor de Nc, se puede obtener de la siguiente fórmula, para ser ingresado correspondientemente

$$Nc' = 14.406$$

Valor obtenido de Nq, el cuál debe ser ingresado en la parte superior de este programa

$$Nc = \frac{Nq - 1}{\tan(\phi_n)}$$

Estatigrafía del suelo:

Altura de Capas del suelo en m.	Angulo de fricción interna.	Cohesión del suelo en kg/cm <sup>2</sup>	Densidad del suelo en T/m <sup>3</sup>	Tipo de suelo en cada capa
h <sub>1</sub> 13.7	φ <sub>1</sub> 21.8	c <sub>1</sub> 0.10	γ <sub>1</sub> 1.663	Fino (arcilla)
h <sub>2</sub> 2	φ <sub>2</sub> 32	c <sub>2</sub> 0	γ <sub>2</sub> 1.853	Granular (arena)
h <sub>3</sub> 5.75	φ <sub>3</sub> 38	c <sub>3</sub> 0	γ <sub>3</sub> 2.085	Granular (arena)
h <sub>4</sub> 13.85	φ <sub>4</sub> 24.9	c <sub>4</sub> 0.16	γ <sub>4</sub> 1.673	Granular (arena)

Para el cálculo de la Capacidad de resistencia última por punta:

$$K_o = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.579 \\ 0.47 \\ 0.384 \\ 0.579 \end{pmatrix} \quad q = 26.349 \text{ T/m}^2 \quad \text{Esfuerzo vertical efectivo}$$

$$Q_{ult\_p} = 133.847 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia por punta en el pilote}$$

Para el cálculo de la Capacidad de resistencia última por fricción lateral:

$$Z_t = \begin{pmatrix} 0 \\ 13.7 \\ 15.7 \\ 21.45 \\ 35.3 \end{pmatrix} \quad \sigma_v' = \begin{pmatrix} 0 \\ 9.083 \\ 10.789 \\ 17.028 \\ 26.349 \end{pmatrix} \quad \sigma_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.542 \\ 9.936 \\ 13.908 \\ 21.688 \end{pmatrix} \quad \sigma_H = \begin{pmatrix} 0 \\ 2.628 \\ 4.672 \\ 5.347 \\ 12.558 \end{pmatrix} \quad \tau = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.051 \\ 1.824 \\ 2.531 \\ 3.743 \end{pmatrix} \quad Q_{ult} = \begin{pmatrix} 0 \\ 45.234 \\ 11.462 \\ 45.716 \\ 162.865 \end{pmatrix}$$

$$Q_{ult\_f} = 56.696 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia por fricción lateral en el pilote}$$

Cálculo del peso propio y de la Capacidad de resistencia última total:

$$P_p = 25.258 \text{ Ton} \quad \text{Peso propio total del pilote}$$

$$Q_{ult\_t} = 165.284 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia admisible total en el pilote}$$

Considerando que el pilote se encuentra solamente en la primera capa de suelo, se tiene:

$$K_o = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.579 \\ 0.47 \\ 0.384 \\ 0.579 \end{pmatrix} \quad q = 26.349 \text{ T/m}^2 \quad \text{Esfuerzo vertical efectivo}$$

$$Q_{ult\_p} = 149.951 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia por punta en el pilote}$$

$$Q_{ult\_f} = 45.234 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia por fricción lateral en el pilote}$$

$$P_p = 25.258 \text{ Ton} \quad \text{Peso propio total del pilote}$$

$$Q_{ult\_t} = 169.927 \text{ Ton} \quad \text{Capacidad última de resistencia admisible total en el pilote}$$

A continuación se encuentran los valores finales para el “Problema 1” y para el “Problema 1 aplicado a STATIC PILES”:

Método de análisis	Capa de ubicación	Qult,f	Qult,p	Qult
	del pilote	ton	ton	ton
Prof. Guía	13.4	30,37	141,76	172,12
STATIC PILES	1	45,234	149,95	169,93
STATIC PILES	2	56,69	133,85	165,28

**Tabla 9: Tabla comparativa de los valores finales de la capacidad de soporte total de un pilote.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

Tal como se aprecia en la Tabla 9, existe una aproximación de los valores finales de la capacidad de soporte última total del pilote, en donde los valores encontrados por STATIC PILES, consideran el peso propio del pilote, a comparación del método de análisis utilizado por el Profesor guía.

Se debe volver a mencionar, que los valores de la Tabla 9 para la capa de ubicación de “13,4”, fueron obtenidos interpolando los resultados encontrados entre los 13 y 14 m. por parte del método del profesor guía.

# **CAPITULO VI**

## **CONCLUSIONES**

En primer lugar, se señalan las conclusiones correspondientes a este trabajo de programación, para luego señalar algunas características de uso y recomendaciones sobre los programas.

### **6.1.- Conclusiones:**

- La metodología empleada, arrojó resultados con un margen de error muy pequeño, comparando los valores entregados entre "LATERAL PILES" y los ejemplos estudiados para este caso, y resultados aproximados entre "STATIC PILES" y el problema revisado.
- Para el caso de "LATERAL PILES", el margen de error pequeño se debe principalmente a que este programa utiliza 11 nodos para su análisis, lo que conlleva a un resultado más exacto comparado con el resultado de los ejemplos, los cuales utilizan 6 nodos. En el caso de "STATIC PILES", se utilizó la metodología propuesta por Vesic, la que es de un carácter más conservador, comparada con la de Meyerhoff o Terzagui, ya que considerando el efecto Suelo-Pilote por Punzonamiento, realiza el cálculo de la capacidad de resistencia en términos del Esfuerzo efectivo, con base en la teoría de Expansión de Cavidades.
- La utilización del software MATHCAD13 es simple y directa, en cuanto a la programación de cualquier tipo de elemento estructural, mediante rutinas, arreglos matriciales o métodos de cálculo como el de elementos finitos, los cuales se ejecutan inmediatamente al ingresar los valores correspondientes a un problema de diseño dado, lo que permite realizar iteraciones en forma continua, hasta que se cumplan los criterios de diseño o hasta que se obtengan los valores requeridos por el análisis.

## **6.2.- Características de uso y Recomendaciones para los programas:**

### **6.2.1.- LATERAL PILES**

- Como se señaló en el capítulo IV, este programa calcula la deformación máxima en la cabeza y en la zona de contacto con el suelo, y la distribución de reacciones en un pilote, producida por una fuerza solicitante lateral de corte que puede ser tomada como una carga sísmica, utilizando el método de modelación por elementos finitos.
- Se debe tener claro la dimensión del pilote que estará en la superficie y la última dimensión que corresponde a la porción del pilote, menor a 0,5 m, la cual puede ser dada aproximadamente. Esta capa se debe ingresar, ya que en su parte superior, el método de diseño determina la última rigidez del suelo aplicada al pilote para la determinación de la matriz de rigidez global del sistema.
- Si se conoce el valor constante del módulo de rigidez del suelo, se debe ingresar en la casilla correspondiente, indicando en la pestaña anexa, su condición de constante a lo largo de su profundidad. Si se desconoce el valor de este módulo, se debe ingresar como variable y determinar las constantes indicadas para la determinación de este.
- Existen áreas de trabajo en donde se encuentran haciendo doble clic, tablas con valores de las constantes a ocupar, recomendadas por algunos autores, así como también áreas de trabajo en donde se pueden ver las matrices generadas por los procedimientos de cálculo. Existen áreas de trabajo bloqueadas con una clave, en donde se encuentran los criterios y fórmulas de programación.
- Se deben ingresar las unidades de los valores tal cuál se mencionan en el programa, para así obtener resultados con valores conocidos y fáciles de interpretar.

### 6.2.2.- STATIC PILES

- Como se señalo en el capitulo IV, este programa verifica el diseño de un pilote a través de la capacidad resistente por punta y por fricción lateral, para una estatigrafía de hasta 10 capas.
- Es importante seleccionar el número de capas con que se está trabajando, lo cuál indica al programa hasta que datos debe interpretar, así como también indicar en que capa de la estatigrafía se encuentra el pilote.
- Si el material del pilote es “acero”, se debe seleccionar en la casilla correspondiente y además agregar el valor de su sección y de su perímetro en las casillas “As” y “p”.
- El programa realiza el cálculo de “Nc”, dependiendo del valor de Nq, el cuál se puede ocupar e ingresar en la casilla correspondiente.
- Se puede agregar el esfuerzo máximo axial solicitante, el cuál es corroborado por el programa indicando “Ok” si el valor de este mayorado por el factor de seguridad, es menor que Qult total. Si es incorrecto, se puede variar el diámetro y largo del pilote hasta que se cumpla el criterio de esfuerzos admisibles.

## BIBLIOGRAFÍA

BOLOGNESI, A. J. 2002. *Ensayos de carga estáticos de compresión en pilotes de Hormigón*. (Disponible en: <http://www.saig.org.ar/Bolognesi.pdf>. Consultado el 04 de Enero de 2007).

BOWLES, J. E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. 5ta ed. McGraw-Hill, New York.

BOWLES, J. E. 1974. *Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering*; McGraw-Hill, New York.

DAS, B. M. 2001. *Fundamentos de Ingeniería Geotecnia*. Internacional Thomson Editores, México. Pp. 495-560.

FORCE 2.0. *Descarga de Software de Programación*. (Disponible en: <http://superdownloads.uol.com.br/download/104/force-fortran-compiler-and-editor/>. Consultado el 08 de Enero de 2007).

FORTRAN. *Tutorial de FORTRAN*. (Disponible en: [http://www.fismat.umich.mx/mn1/tutor\\_fort/index.html](http://www.fismat.umich.mx/mn1/tutor_fort/index.html). Consultado el 08 de Enero de 2007).

FRIAS, E. V. 2004. *El Método de los Elementos Finitos*. (Disponible en: <http://www.fi.uba.ar/materias/6510/Clase%2003-Notas%20sobre%20Elementos%20Finitos.pdf>. Consultado el 12 de Marzo de 2007).

GUNARATNE, M. 2006. *The Foundation Engineering*; Taylor and Francis Group, LLC, Florida.

OBANDO, L. L. 2004. *Utilización de la Interpolación en el método de elementos finitos*. (Disponible en: [http://www.fc.uni.edu.pe/publicaciones/rev09-01/6\\_Mantilla\\_final.pdf](http://www.fc.uni.edu.pe/publicaciones/rev09-01/6_Mantilla_final.pdf). Consultado el 12 de Marzo de 2007).

PILOTAJE. 2003, Julio. *Pilotaje, Cimentaciones Profundas*. (Disponible en: <http://www.construaprende.com/Trabajos/T3/Pilotajecim.html>. Consultado el 04 de Enero de 2007).

TERZAGUI, K.; R. B. PECK. 1973. *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica, 2 ed.*; John Wiley and Sons, Inc., New York, NY. Pp. 521-553.

VELASCO, E. 2001. *Un breve curso de FORTRAN*. (Disponible en: <http://www.uam.es/departamentos/ciencias/fisicateoricamateria/especifica/hojas/kike/FORTRAN/FORTRAN.html>. Consultado el 04 de Enero de 2007).

# **ANEXO A**

## **PROGRAMAS ORIGINALES EN FORTRAN IV**

A continuación, se entrega el detalle de la programación original para LATERAL PILES y para STATIC PILES, por J. E. Bowles, en su libro “Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering”.

La recuperación de estos programas se realizó en el software FORCE 2.0.

### PROGRAMA ORIGINAL LATERAL PILES

```

C  JE BOWLES MATRIX DISPLACEMENT ANALYSIS OF A LATERALLY LOADED PILE
C  *PILE MAY BE FULLY OR PATIALLY EMBECDDDED--JTSS = NODE SOIL BEGINS
C  UNITS = KIPS (KN); KSF (KN/SQ M); KCF (KN/CU M); FT OR M EXCEPT XM
C  XL = PILE LENGTH; BX = WIDTH SQ PILE; DX = DIAM IF ROUND; BX OR DX
C  NI > 0 TO READ MOM OF INERTIA; LIST = A,ASAT IF > 0; JJS = NO NODE
C  S-MATRIX TO CORRECT; JTSS = NODE SOIL STARTS = 1 IF FULLY EMBEDD
C  EXPO = EXPONENT FOR SOIL MOD. VARIATION WITH DEPTH
C  NCL = NC OF LOADING CONDITIONS--ONLY FOR LARGES VALUES OF XMAX
C  IF ANY NODE SPRING = 0 FOR XMAX--ADJACENT NODE SPRING REDUCED 25%
C  (-) P(I) FORCE IS TO RIGH
      DIMENSION X(47),P(47),F(70),F1(70),SOIR(70),SMOD(70),G(67),PM(67)
      DIMENSION A(46,67),S(67,2),C(67,46),E(46,46)
      DIMENSION LSUM(46),V(46),EE(46),SM(70),PC(46),TITLE(20)
      EQUIVALENCE (A(1,1),E(1,1))
      DOUBLE PRECISION UT5,UT6,NCL,NLC
6000 READ (1,1000,END=150) TITLE,UT1,UT2,UT3,UT4,UT5,UT6,FU1,FU2
1000 FORMAT (20A4/4(A4,6X),A8,2X,A8,2X,2F10.2)
      READ (1,105)KL,JJS,NCL,NI,NP,JTSS,LIST
105 FORMAT(7I5)
      WRITE (3,1001)TITLE
1001 FORMAT('1', T5,20A4)
      READ(1,4)XL,BX,DX,ELAS,XMAX
4 FORMAT(6F10.4)
151 WRITE(3,93)XL,UT1,BX,UT1,DX,UT1,ELAS,UT5,JJS,JTSS,NLC
93 FORMAT(//,T5,'*****LATERALLY LOADED PILE BY INFINITE ELEMENT METH
1OD'//,T5,'PILE LENGTH =',F6.2,1X,A2/T5,'PILE WIDTH (IF SQ) =',F6
2.4,1X,A2,5X,'PILE DIAM (IF ROUND) =',F6.4,1X,A2/T5,'PILE MOD OF E
3LAS =',F10.0,1X,A7/T5,'NO OF NODES REQUIRING CORRECT =',12/T5,'NOD
4E SOIL STARTS =',13,5X,'NO OF LOAD CONDITIONS =',13//)
      READ(1,4)AS,BS,EXPO
      WRITE(3,214)AS,BS,EXPO,XMAX,UT2
214 FORMAT(//,'SORGRADE MODULUS =',1X,F12.2,' + ',F9.2,'*Z**',F5.3,//,
1T10,'MAX LINEAR SOIL DEFORM, XMAX =',F5.2,1X,A2)
      M = 3*KL + 1
      N = 2*KL + 2
      KD = M-N
      KP = KL + 1
      KK = 2*KL
      KM = N-1
      K1 = KL + 2
      JS = 2
      LSUM(JS-1) = 0
      INDEX2 = 0
      IF(BX.GT.0..AND.NI.LE.0)XI = BX**4/12.
      IF(DX.GT.0..AND.NI.LE.0)XI = .0491*DX**4
      IF(NI.GT.0)READ(1,4)XI
      IF(DX.GT.0.)BX = DX
206 AKL = KL
      H = XL/AKL
      WRITE(3,98)XI,UT1,H,UT1
98 FORMAT(T10,'THE MOMENT OF INERTIA OF THE PILE =',F10.7,1X,A2,'**4'
1//T10,'PILE SEGMENT LENGTHS =',F8.3,1X,A2//)

```

```

C*** BUILD A-MATRIX ** NON-LINEAR LCCP BEGINS SINCE A e ASAT COMMON
  DO 308 I = 1,M
    SMOD(I) = 0.
    DO 308 J = 1,2
308 S(I,J) = 0.
    55 DO 508 I=1,N
      DO 508 J =1,M
508 A(I,J)=0.
      A(KP,KK) = 1.
      A(1,1)=1.0
      NN=2
      DO 501 J = 2,KL
        DO 501 I=2,3
          A(J,NN)=1.0
501 NN=NN+1
      K = KM
      DO 503 J = K1,N
        A(J,K)=-1.0
503 K=K+1
      NN=1
      DO 504 J = K1,KM
        DO 504 I=2,3
          A(J,NN)=1./H
504 NN=NN+1
      K3 = KL+3
      NN=1
      DO 506 J = K3,N
        DO 506 I=2,3
          A(J,NN)=-1./H
506 NN=NN+1
      IF(JS.GT.2)GO TO 300
      IF(LIST.LE.0)GO TO 9544
      WRITE(3,50)
      50 FORMAT(////,T30,'THE STATICS MATRIX IS',/)
      DO 9151 I = 1,N
9151 WRITE(3,38)(I,A(I,J),J=1,M)
      38 FORMAT(1X,'ROW',I2,1X,10F9.4/,,(7X,10F9.4))
C***BUILD S-MATRIX IN 2-COLUMNS
9544 DO 107 I = 1,KK
      DO 107 J = 1,2
      S(I,1) = 4.*ELAS*XI/H
      S(I,2) = 2.*ELAS*XI/H
      IF(I/2*.EQ.I)GO TO 103
      GO TO 107
103 SAVE = S(I,1)
      S(I,1) = S(I,2)
      S(I,2) = SAVE
107 CONTINUE
C*** BUIL SOIL K--1ST K IS REDUCED 50% ARBITRARILY
      WRITE(3,322)
322 FORMAT(//,T5,'THE SOIL MODULUS AT NODE')
      DO 205 I = JTSS,KP
      AM = I-JTSS
      SMOD(I)= AS +BS*(AM*H)**EXPO
205 WRITE(3,323)I, SMOD(I)
323 FORMAT(T8, I2, 3X, F12.5)
      S(KK+JTSS,1)=(7.*SMOD(JTSS)+6.*SMOD(JTSS+1)-SMOD(JTSS+2))*H*BX/48.
      S(KK+JTSS,2) = 0.
      S(M,1) = (7.*SMOD(KP)+6.*SMOD(KP-1)-SMOD(KP-2))*H*BX/24.
      S(M,2) = 0.
      KJTS = KK+JTSS+1
      MM = M-1
      MK = N-3
      DO 209 I = KJTS,MM
      S(I,2) = 0.
209 S(I,1) = H*BX*(SMOD(1-KM)+10.*SMOD(1-KK)+SMOD(1-MK))/12.
      DO 115 I = KM,M

```

```

115 SM(I) = S(I,1)
C   MODIFICATION OF S-MATRIX--READ AS MANY CARDS AS JJS
    IF(JJS.LE.0)GO TO 99
    READ (1,1008) (I,J,S(I,J),II=1,JJS)
1008 FORMAT(2I5,F10.2)
C*** FORM P-MATRIX ..EXTERNAL LOADS--NCN-LINEAR SOIL EFFECTS
99 LSUM(JS) = 0
    INDEX2 = INDEX2 + 1
C**** EXTERNAL LOADS INTO P-MATRIX READ NON ZERO VALUES TO NP
    SUML = 0.
    DO 241 I = 1,N
      G(I) = 0.
241 P(I) = 0.
    DO 211 JJ = 1,NP
      READ (1,212)I,P(I)
212 FORMAT(I5,F10.4)
211 IF(I.GT.KL+1)SUML = SUML + P(I)
      IF(INDEX2.GT.1.AND.NLC.GT.1)WRITE(3,8490)INDEX2
8490 FORMAT(/,T5,'COMPUTATION FOR LOAD CONDITION',I2,/)
C** NON-LINEAR SOIL ENTRIES--G(I)
300 DO 213 I =1,N
213 PM(I) = P(I) + G(I)
      IF(JS-3)215,216,216
215 WRITE(3,223)
223 FORMAT(/,T5,'THE P-MATRIX IS A FOLLOWS', T35, 'THE NON-LINEAR SO
      11L FORCES, G(I), ARE',/)
      GO TO 225
216 WRITE(3,48)
48 FORMAT(/,T5,'THE MODIFIED P-MATRIX IS', T35, 'THE NON-LINEAR SO
      11L FORCES, G(I), ARE',/)
225 WRITE (3,47)(I,PM(I),G(I),I=1,N)
47 FORMAT(T8,I2,F15.4, T37, F15.4)
      WRITE(3,226)
226 FORMAT(/,T5, 'THE S-MATRIX IN TWO COLUMNS')
      WRITE(3,227) (I,S(I,1),S(I,2), I=1,M)
227 FORMAT(T5,I3,2X,F12.2,2X,F12.2)
      IF(INDEX2.GT.1.AND.NLC.GT.1)GO TO 232
C   *** BUILD THE SAT-MATRIX
    DO 12 I = 1,KK
    DO 12 J=1,N
      KA = 1
      IF(I/2*.EQ.1)KA = KA-1
12 C(I,J) = S(I,1)*A(J,KA)+S(I,2)*A(J,KA+1)
      DO 530 I = KM,M
      DO 530 J = 1,N
530 C(I,J) = S(I,1)*A(J,I)
C   *** BUILD THE ASAT-MATRIX
    DO 10 I = 1,N
    DO 15 J=1,N
      EE(J) = 0.
      DO 15 K=1,M
        EE(J) = EE(J)+A(I,K)*C(K,J)
15 CONTINUE
      DO 10 L = 1,N
10 E(I,L) = EE(L)
      IF(LIST.LE.0)GO TO 9168
      WRITE(3,9164)
9164 FORMAT(/,T5,'THE ASAT MATRIX WITH 10**3 FACTORED',/)
      DO 9165 I = 1,N
9165 WRITE(3,9166)(I,E(I,J),J=1,N)
9166 FORMAT(T2,I2,2X,-3P14F8.3)
C**** END OF ASAT FORMATION--INVERT ASAT MATRIX--USEE GAUSS-JORDAN METHOD
9168 DO 25 K=1,N
      DO 20 J=1,N
20 IF(J.NE.K)E(K,J)=E(K,J)/E(K,K)
      DO 210 I=1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO 210

```

```

DO 21 J=1,N
IF(J.EQ.K) GO TO 21
E(I,J)=E(I,J)-E(K,J)*E(I,K)
21 CONTINUE
210 CONTINUE
DO 22 I=1,N
22 IF(I.NE.K)E(I,K)=-E(I,K)/E(K,K)
E(K,K)=1./E(K,K)
25 CONTINUE
C*** END OF ASAT INVERSION--COMPUTE X-MATRIX
232 DO 18 I=1,N
X(I)=0.
DO 18 K=1,N
PC(K) = P(K)
IF(JS.GT.2)PC(K) = PM(K)
18 X(I) = X(I) + E(I,K)*PC(K)
C*****COMPUTE F-MATRIX--F = SAT*X
DO 35 I=1,M
F(I)=0.
DO 35 K=1,N
35 F(I)=F(I)+C(I,K)*X(K)
IF(JS.LE.2)GO TO 39
DO 37 I = KM,M
37 F(I) = F(I) + G(I-KD)
39 DO 233 I = K1,N
233 X(I) = X(I)*FU1
WRITE(3,4)UT3,UT4,UT2,UT3,UT4
41 FORMAT(///T11,'THE P-MATRIX',18X,'THE JOIN DEFLECTIONS',17X,
1'THE BEND. MOMENTS'/T8,'(',A4,' CR ',A4,') IS',18X,
2'(RADIANS OR ',A2,') ARE',18X,'(',A4,' OR ',A4,') ARE'/)
C NOTE THAT ORIGINAL P-MATRIX IS ALWAYS WRITTEN HERE
WRITE(3,44)(I,P(I),I,X(I),I,F(I),I=1,KK)
44 FORMAT(T7,'LOAD DIR.',I3,F10.4,T39,'JOINT DIR.',I3,F13.6,T79,'MOME
1NT',I3,F12.3)
DO 49 I=KM,N
NUM=I+1
49 WRITE(3,51) I,P(I),I,X(I),I,F(I)
51 FORMAT(T7,'LOAD DIR.',I3,F10.4,T39,'JOINT DIR.',I3,F13.6,T79,'FORC
1E ',I3,F11.4)
IF(NUM.EQ.(M+1)) GO TO 43
DO 42 I=NUM,M
42 WRITE(3,52) I,F(I)
52 FORMAT(T79,'FORCE ',I3,F11.4)
43 CONTINUE
C*** COMPUTE SEGMENT SHEARS AND MOMENTS
WRITE(3,234)
234 FORMAT('1///',T5,'SHEAR AL EACH',T22,'BEND. MOMENT AT EACH ORDINA
1TE', T55, 'SOIL REACTION AT')
WRITE(3,235)UT3,UT4,UT3
235 FORMAT(T6,'SEGMENT ',A4,T31,A4,T58,'EA.ORD.',A4//)
VI = 0.
K = KP
J = KK
DO 236 I=1,KL
K=K+1
J=J+1
V(I) = VI - P(K) - F(J)
236 VI = V(I)
SUM = 0.
DO 237 I = 1,KP
SOIR(I) = -F(I+KK)
237 SUM = SUM + SOIR(I)
L = -1
DO 238 I = 1,KL
L=L+2
238 WRITE(3,239)I,V(I), I, F(L), SOIR(I)
239 FORMAT(T5,I2,F10.4, T24, I2, F15.4, T55,F15.4)

```

```

FX=-F(KK)
WRITE(3,242)KP,FX,SOIR(KP)
242 FORMAT(T24,I2,F15.4,T55,F15.4)
WRITE(3,243)SUM,SUML
243 FORMAT(T34,'SUM OF SOIL REACTIONS =',T55,F15.4,T72,'(',F10.3,')')
C*** TEST NON-LINEAR--ZERO S-MATRIX AND F = K*XMAX = NEG. P-MATRIX ENTR
IF(NLC.GT.1)GO TO 149
LSUN = 0
K2 = KP+JTSS
DO 245 I = K2,N
IF(ABS(X(I)).LT.XMAX)GO TO 245
244 G(I) = SM(I+KD)*XMAX/FU1
S(I+KD,1) = 0.
S(I+KL,1) = 0.75*S(I+KL,1)
LSUN = LSUN + 1
245 CONTINUE
LSUM(JS) = LSUN
IF(LSUM(JS)-1)149,246,246
246 IF(JS.EQ.7.OR.LSUM(JS).LE.LSUM(JS-1))GO TO 149
IF(JS.LE.2)GO TO 54
IF(LSUM(JS).GE.KL/2+1)GO TO 148
54 JS = JS+1
INDEX1 = JS-2
WRITE(3,1048)INDEX1,LSUM(JS-1)
1048 FORMAT(//,T10, '***COMPUTATION CYCLE',I3,' XMAX EXCEEDED AT',I3,'
1NODES',/)
GO TO 55
148 WRITE(3,1010)
1010 FORMAT(//,T5, '***PILE UNSTABLE--1/2 OR MORE NODES EXCEED XMAX')
149 IF(INDEX2.LT.NLC)GO TO 99
GO TO 6000
150 STOP
END

```

(BOWLES, 1974)

## PROGRAMA ORIGINAL STATIC PILE

```

C   JE BOWLES STATIC PILE ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD
C   PILE MAY BE BATTERED; FULLY CR PARTIALLY EMBEDDED AND WITH VARIABL
C   CROSS-SECTION--USE EITHER FPS CR METRIC UNITS
      DIMENSION ASAT(48,48),EA(6,6),P(48),X(48,2),XIN(20),XMOD(48,2),
      1SLIP(20,2),SS(20),DELX(20),SK(20),SUMDX(20),NEC(10),XC(10,10),
      2YC(10,10),PF(51),ELEMX(20),XL(20),XI(20),PER(20),BMEM(20),B(20),
      3AREA(20),ES(6,6),ESAT(6,6),EASAT(6,6),F(6),FRIC(20),PAXIS(20),
      4MND(20),NPE(20,6),EAOL(20),SM(20),RSPR(20,2),TITLE(20)
      DOUBLE PRECISION UT5,UT6,UT7,UT8
7000 READ(1,1000,END=6000)TITLE,UT1,UT2,UT3,UT4,UT5,UT6,UT7,UT8
1000 FORMAT(20A4/4(A4,6X),4(A8,2X))
      READ(1,101)NP,NM,NNZF,NC,IPRD,NLC,JTSOIL,NDELTA,JJS,LIST,NSTRPT,IU
101  FORMAT(12I5)
      WRITE(3,1001)TITLE
1001 FORMAT('1',///,T5,20A4)
      NMP = NM +1
      FU1 = 12.
      IF(IU.EQ.2)FU2 = 98.07
      READ(1,102)E,PIL,POINTK,AREAP,ALPHA,PERPP,POINTX,XMAX
102  FORMAT(8F10.4)
      WRITE(3,625)E,UT8,PIL,UT1,POINTK,UT7,AREAP,UT2,POINTK,UT1,PERPP,NM
      1,JTSOIL,NLC,XMAX,UT2
625  FORMAT(/,T5,'E =',F12.3,1X,A8,      5X,'PILE LENGTH =',F7.3,1
      1X,A2/T5, 'POINT SPRING =',F12.3,1X,A4,5X, 'PILE POINT X-SECTION ='
      2,F8.3, ' SQ ',A2/ T15,'INITIAL POINT DEFL =',F7.4,1X,A2/ T15,'ASSU
      3MED POINT LOAD =',F8.4,' PERCENT',5X,'NO OF PILE SEGMENTS =',I3/T2
      40,'JOINT SOIL STARTS =',I3,3X,'NO OF LOAD CONDITIONS =',I3,/,T7, '
      5MAX POINT DEFLTO REDUCE POINTK 25% =',F7.4,1X,A2)
      IF(NDELTA.GT.0)WRITE(3,632)
632  FORMAT(/,T7,'*** P-DELTA EFFECT IS CONSIDERED IN COMPUTATIONS **')
      READ(1,102)AS,BS,EXPO
      WRITE(3,1005)AS,BS,EXPO,UT6
1005 FORMAT(/,T5,'SOIL MODULUS =',F8.1,' + ',F7.2,'Z**',F5.3,1X,A8)
      SAVEK = POINTK
      E = E*FU2
      AREAP =AREAP/(FU1*FU1)
      DO 103 I=1,NP
      DO 103 J=1,NP
103  ASAT(I,J)=0.0
      JCOUN = 1
7500 II=0
      JJ=0
      JJJ = 1
      SUMH = 0.
      DO 4 I=1,NP
      X(I,2) = 0.
      4 P(I) = 0.
      WRITE(3,546)
546  FORMAT(/,T5,'THE INITIAL P-MATRIX')
      DO 5 IP=1,NNZP
      READ(1,6)I,P(I)
      6 FORMAT(I5,F10.4)
      5 WRITE(3,547)I,P(I)
547  FORMAT(T3,I3,3X,F12.3)
      NMP1 = NM+1
      DO 7510 I= 1,NMP1
      PAXIS(I) = 0.
7510 FRIC(I) = 0.
      ALPHAR = ALPHA/57.2957731
      XSIN=SIN(ALPHAR)
      XCOS=COS(ALPHAR)
      PAXIS(1) = P(1)*XSIN + P(2)*XCOS
      IPAXIS = PAXIS(1)
      IF(IPRD.LE.0)PAXIS(1) = 0.
      IF(IPRD.GT.0)PHOLDV = P(1)

```

```

IF(IPRD.GT.0)PHOLDH = P(2)
IF(NLC.GT.0.AND.JCOUN.GT.1)GO TO 2000
C  READ LOAD TRANSFER DATA AT 8 COORDS PER CARD X = SLIP; Y = SHEAR S
C  NEC(JJ) = NO OF ELEMENTS FOR CORRESPONDING LOAD TRANSFER CURVE DAT
DO 1012 JJ = 1,NC
  READ(1,6)NEC(JJ)
  READ(1,102)(XC(I,JJ),I=1,NSTRPT)
  READ(1,102)(YC(I,JJ),I=1,NSTRPT)
  WRITE(3,548)NEC(JJ),(XC(I,JJ),I=1,NSTRPT),UT2
548 FORMAT(/T10,'NO OF PILE ELEMENTS FOR FOLLOWING CURVE DATA =',I3//
  1T2,'XC=',8F10.5,2X,A2)
1012 WRITE(3,549)(YC(I,JJ),I=1,NSTRPT),UT5
549 FORMAT(T2,'YC =',8F10.5,2X,A7)
  WRITE(3,177)NC,(NEC(JJ),JJ=1,NC)
177 FORMAT(/,T5,'NO OF SHEAR STR CURVES =',I3,3X, 'NO OF ELEMENTS PER
  1 CURVE IN SEQUENCE =', 5(I3,2X))
  WRITE(3,104)UT1,UT2,UT1,UT1,UT2
104 FORMAT(  ///,T7, 'MEMNO',2X,'NP1', 2X,'NP2',2X,'NP3',2X,'NP4',2X
  2,'NP5',2X, 'NP6', 3X, 'ALPHA',4X,'L ',A2,2X,'I', 'A2','**4',2X,
  3'WIDTH, ',A2,2X,'PERIM, ',A2,2X,'A SQ',A2//)
  K = 1
  DO 520 I = 1,NM
    MNO(I) = I
    NPE(I,1) = K
    NPE(I,2) = K+1
    NPE(I,3) = K+2
    NPE(I,4) = K+3
    NPE(I,5) = K+4
    NPE(I,6) = K+5
    K = K+3
    READ(1,102)XL(I),XIN(I),BMEM(I),PER(I),AREA(I),RSPR(I,1),RSPR(I,2)
    B(I) = BMEM(I)/FU1
    WRITE(3,108)MND(I),(MPE(I,IZ),IZ=1,6),ALPHA,XL(I),X1N(I),B(I),PER(
    AI),AREA(I)
108 FORMAT(5X,7I5,3X,F7.3,2X,F6.2,2X,F8.2,3(4X,F6.2))
    AREA(I) = AREA(I)/(FU1*FU1)
    EAOL(I) = E*AREA(I)/XL(I)*2.
520 XI(I) = X1N(I)/(FU1**4)
    AL = 0.
    DO 522 I = 1,NMP
      SK(I)= AS + BS*AL**EXPO
      IF(I.LT.JTSOIL)SK(I) = 0.0
522 IF(I.GE.JTSOIL.AND.I.LE.NM)AL=AL+XL(I)
C*****MODIFY SUBGRADE MODULUS IF JJS>0
212 FORMAT(I5,F10.1)
  IF(JJS.GT.0)READ(1,212)(JTNC,SK(JTND),M=1,JJS)
517 WRITE(3,887)
887 FORMAT(/,T5,'NODE',3X, 'SOIL MODULUS AT NODE',3X,'MEMND',5X,'SOIL
  1 SPRING 1',3X, 'SOIL SPRING 2')
8000 DO 205 IP = 1,NM
8050 EIOL = E*XI(IP)/XL(IP)
  SINOL = XSIN/XL(IP)
  COSOL = XCOS/XL(IP)
  SSPR1 = 0.0
  SSPR2 = 0.0
  IF(IP.LE.JTSOIL-1)GO TO 528
  IF(IP.EQ.NM)GO TO 523
  SSPR1 = XL(IP)*B(IP)*(7.*SK(IP)+6.*SK(IP+1)-SK(IP+2))/24.
  SSPR2 = XL(IP)*B(IP)*(3.*SK(IP)+10.*SK(IP+1)-SK(IP+2))/24.
  IF(RSPR(IP,1).GT.0)SSPR1 = RSPR(IP,1)
  IF(RSPR(IP,2).GT.0)SSPR2 = RSPR(IP,2)
  IF(IP.EQ.JTSOIL.AND.RSPR(IP,1).LE.O)SSPR1 = .5*SSPR1
  GO TO 528
523 SSPR1 = XL(IP)*B(IP)*(3.*SK(IP+1)+10.*SK(IP)-SK(IP-1))/24.
  SSPR2 = XL(IP)*B(IP)*(7.*SK(IP+1)+6.*SK(IP)-SK(IP-1))/24.
528 IF(I.LE.O)WRITE(3,888)IP,SK(IP),IP,SSPR1,SSPR2
888 FORMAT(T5,I4,10X,F12.3,T35,I4,5X,F12.3,5X,F12.3)

```

```

DO 1010 IJ = 1,6
DO 1010 JJ = 1,6
EA(IJ, JJ) = 0.0
1010 ES(IJ, JJ) = 0.0
EA(1,1)=+COSOL
EA(1,2)=+COSOL
EA(1,3)=+XSIN
EA(1,5)=-XCOS
EA(2,1)=-SINOL
EA(2,2)=-SINOL
EA(2,3)=+XCOS
EA(2,5)=+XSIN
EA(3,1)=1.0
EA(4,1)=-COSOL
EA(4,2)=-COSOL
EA(4,4)=-XSIN
EA(4,6)=-XCOS
EA(5,1)=+SINOL
EA(5,2)=+SINOL
EA(5,4)=-XCOS
EA(5,6) = +XSIN
EA(6,2) = 1.0
EA(1,1) = 4.*EIOL
EA(1,2) = 2.*EIOL
EA(2,1) = 2.*EIOL
EA(2,2) = 4.*EIOL
IF(IP.LT.NM)XLMAX = MAX1(XL(IP),XL(IP+1))
IF(IP.LT.NM)XLMIN = MIN1(XL(IP),XL(IP+1))
IF(IP.GT.1)XLMAX2 = MAX1(XL(IP-1),XL(IP))
IF(IP.GT.1)XLMIN2 = MIN1(XL(IP-1),XL(IP))
RATIO = XLMAX/XLMIN
SUMSQ = (1.+RATIO)**2
FAC2 = SUMSQ/(RATIO**2)
F1 = SUMSQ
IF(IP.EQ.1)GO TO 756
IF(XL(IP).GT.XL(IP+1))F1 = FAC2
RATIO2 = XLMAX2/XLMIN2
SUMSQ2 = (1.+RATIO2)**2
FAC4 = SUMSQ2/(RATIO2**2)
F3 = SUMSQ2
IF(XL(IP).GT.XL(IP-1))F3 = FAC4
756 IF(IP.EQ.1)F3 = 1.
ES(3,3) = EAOL(IP)/F3
IF(II.GT.0)ES(3,3) = EAOL(IP)
IF(IP.EQ.1)ES(3,3) = EAOL(IP)
ES(4,4) = EAOL(IP)/F1
IF(II.GT.0)ES(4,4) = EAOL(IP)
IF(IP.EQ.NM)ES(4,4) = EAOL(IP)
ES(5,5) = SSPR1
ES(6,6) = SSPR2
DO 202 I = 1,6
DO 202 J=1,6
ESAT(I,J)=0.0
DO 202 K = 1,6
202 ESAT(I,J)=ESAT(I,J)+ES(I,K)*EA(J,K)
IF(II.GT.0) GO TO 605
203 DO 204 I=1,6
DO 204 J=1,6
EASAT(I,J)=0.0
DO 204 K = 1,6
204 EASAT(I,J)=EASAT(I,J)+EA(I,K)*ESAT(K,J)
DO 205 I=1,6
NS1 = NPE(IP, I)
DO 205 j=1,6
NS2 = NPE(IP, J)
205 ASAT(NS1,NS2)=ASAT(NS1,NS2)+EASAT(I,J)
521 WRITE(3,889)NMP,SK(NMP)

```

```

889 FORMAT(T5,I4,10X,F12.3)
  IF(LIST.LE.0)GO TO 518
  WRITE(3,304)
304 FORMAT(//,T5,'THE ASAT MATRIX',/)
  DO 302 I=1,NP
302 WRITE(3,303)I,(ASAT(I,J),J=1,NP)
303 FORMAT(I3,2X,12F10.2)
C   ASAT INVERSION
518 M = NP
  DO 25 K=1,M
  DO 20 J=1,M
20 IF(J.NE.K)ASAT(K,J)=ASAT(K,J)/ASAT(K,K)
  DO 210 I=1,M
  IF(I.EQ.K) GO TO 210
  DO 21 J=1,M
  IF(J.EQ.K) GO TO 21
  ASAT(I,J)=ASAT(I,J)-ASAT(K,J)*ASAT(I,K)
21 CONTINUE
210 CONTINUE
  DO 22 I=1,M
22 IF(I.NE.K)ASAT(I,K)=-ASAT(I,K)/ASAT(K,K)
25 ASAT(K,K)=1.0/ASAT(K,K)
C *****END OF ASAT INVERSION--COMPUTE X-MATRIX*****
2000 P11B = P(1)
  P21B = P(2)
  P31B = P(3)
  DO 7 I=1,NP
  X(I,1)=X(I,1)+ASAT(I,J)*P(J)
  IF(ABS(X(I,1)).LT..0000001)X(I,1) = 0.0
7 XMOD(I,1) = X(I,1)
  XPDEL = X(2,2)
  WRITE(3,890)JJJ
890 FORMAT(//,T5,'THE X-MATRIX FOR CYCLE',I3,'IS')
  ANP = NP/6
  INP = ANP
  IF(INP.LT.ANP)INP=INP+1
  IZ = 1
  DO 188 I = 1,INP
  IZP = IZ+5
  IF(IZP.GT.NP)IZP= NP
  WRITE(3,623)(NN,X(NN,1),NN=IZ,IZP)
188 IZ = IZP+1
623 FORMAT(T3,I3,F10.6,5(I4,F10.6))
C ***** COMPUTE ELEMENT DEFLECTIONS *****
  MM = 1
  DO 26 I = 1,NM
  XPER1 = XL(I)/(XL(I)+XL(I+1))
  IF(I.GT.1)GO TO 27
  ELEM(X(I)) = X(MM,1)*XSIN + X(MM+1,1)*XCOS + X(MM+3,1)*XPER1*XSIN +
  AX(MM+4,1)*XPER1*XCOS
  GO TO 26
27 XPER2 = XL(I)/(XL(I-1)+XL(I))
  IF(I.EQ.NM) GO TO 28
  ELEM(X(I)) = X(MM,1)*XPER2*XSIN + X(MM+1,1)*XPER2*XCOS + X(MM+3,1)*
  1XPER1*XSIN + X(MM+4,1)*XPER1*XCOS
  GO TO 26
28 ELEM(X(NM)) = X(NP-2,1)*XSIN + X(NP-1,1)*XCOS + X(MM,1)+XPER2*XSIN +
  A X(MM+1,1)*XPER2*XCOS
  IF(P(NP-2).GT.0.0.OR.POINTK.LE.0.)GO TO 26
  POINTF = P(NP-2)/XSIN
C   NOTE PTDEF1 IS APPROX VALUE OF PRECED CYCLE IF P(NP-2)<0.
  POINTK = SAVEK
311 PTDEF1 = POINTF/POINTK
  IF(POINTK.LE..75*SAVEK)GO TO 26
  IF(ABS(PTDEF1*FU1).GT.XMAX)POINTK = .75*SAVEK
  IF(POINTK.LE..75*SAVEK)GO TO 311
26 MM=MM+3

```

```

IF(JJJ.LT.2.AND.PTDEF1.GT.POINTX)PTDEF1 = POINTX
IF(JJJ.GT.2)PTDEF1 = (PTDEF1+PTDEF2)/2
MM=NM
DO 9 I=1,NM
IF(I.GT.1) GO TO 10
SUMDX(MM) = ELEM(X(MM))+PTDEF1
DELX(MM)=ELEM(X(MM))
SLIP(MM,1) = (DELX(MM) + PTDEF1)*FU1
GO TO 11
10 DELX(MM)=DELX(MM+1)+ELEM(X(MM))
SUMDX(MM) = SUMDX(MM+1) + ELEM(X(MM))
SLIP(MM,1) = (DELX(MM) + PTDEF1)*FU1
11 IF(SLIP(MM,1).LT.0)SLIP(MM,1) = -SLIP(MM,1)
9 MM=MM-1
WRITE(3,30)UT1,UT1,UT2,PTDEF1,UT1
30 FORMAT(//,T5,'ELEM NO',2X,'TOT ELEM DISP',A2,3X,'ELEM MOVE,',A2,
15X,'ELEM SLIP',A2,4X,'PTDEF1 =',F10.7,1X,A2)
DO 32 I=1,NM
32 WRITE(3,31)I,SUMDX(I),ELEM(X(I),SLIP(I,1)
31 FORMAT(T7,I3,5X,F12.6,5X,F12.6,3X,F12.6)
IF(LIST.GT.0)WRITE(3,626)
626 FORMAT(//,T10,'PRINT COUNTERS USED TO RECOMPUTE P-MATRIX')
3060 K = 1
KN = 1
I2 = 1
KCC = NEC(KN)
DO 501 KZ = 1,NP
501 IF(KZ/3*3.NE.KZ)P(KZ)=0.
DO 52 I = 1,NM
IF(I.GT.KCC)I2=KN+1
IF(I2.NE.KN)KCC = KCC+NEC(I2)
DO 54 JJ = 1,8
IF(XC(JJ,I2).GT.SLIP(I,1))GO TO 43
IF(XC(JJ,I2).EQ.SLIP(I,1))GO TO 44
54 CONTINUE
43 JJ = JJ-1
44 C1 = ABS(YC(JJ+1,I2)-YC(JJ,I2))
DELYC = 0.
C2 = XC(JJ+1,I2)-XC(JJ,I2)
IF(YC(JJ+1,I2).LT.YC(JJ,I2))C1 = -C1
DELTAX = SLIP(I,1) - XC(JJ,I2)
IF(ABS(C2).LE..0000001)C2 = 0
IF(C2.EQ.0.)GO TO 261
DELYC = DELTAX*C1/C2
261 SS(I) = YC(JJ,I2)+DELYC
FRIC(I) = XL(I)*PER(I)*SS(I)
JPLUS = I+1
IF(IPRD.GT.0)GO TO 45
IF(IPAXIS)234,235,235
234 PAXIS(I+1) = PAXIS(I) - FRIC(I)
GO TO 46
235 PAXIS(I+1) = PAXIS(I) + FRIC(I)
GO TO 46
45 IF(PAXIS(I))81,80,80
80 PAXIS(I+1) = PAXIS(I)-FRIC(I)
IF(PAXIS(I+1).LT.0..AND.FRIC(I).NE.0.)PAXIS(I+1) = 0.0
GO TO 46
81 PAXIS(I+1) = PAXIS(I)+FRIC(I)
IF(PAXIS(I+1).GT.0..AND.FRIC(I).NE.0.)PAXIS(I+1) = 0.0
46 IF(LIST.GT.0)WRITE(3,154)NFC(I2),XC(JJ,I2),XC(JJ+1,I2),JJJ,JJ,I2,
1KCC,JPLUS,PAXIS(I+1),UT3,FRIC(I),UT3,PAXIS(I),UT3
154 FORMAT(T15,'NEC(I2)=' ,I3,3X,'XC(JJ,I2)=' ,F7.5,3X,'XC(JJ+1,I2) =',
1F7.5/ T10,'JJ=' ,I3,3X,'JJ=' ,I3,3X,'I2=' ,I3,3X,'KCC=' ,I3/ T12,
2'CURRENT VALUE PAXIS(' ,I3,') =',F10.3,1X,A4,5X,'ELEM. FRIC =',
3F10.3,1X,A4/ T14,'CURRENT VALUE PAXIS(I) =',F10.3,1X,A4)
52 KN = I2
C POINT EFFECTS INCLUDED IN P-MATRIX--***--NOTE POINTX OR PERPP ARE

```

```

C READ DATA: PTDEFL IS COMPUTED POINT DEFLECTION
POINTF = POINTF1*POINTK
IF(PTDEF1.GT.0.)POINTF = 0.0
IF(IPRD.GT.0)GO TO 151
IF(PERPP.GT.0.)GO TO 48
47 PAXIS(NM+1) = PAXIS(NM+1)+POINTF
GO TO 151
48 PAXIS(NM+1) = PAXIS(NM+1)*(1.+PERPP)
POINTF = PAXIS(NM+1)-(1.-PERPP)*PAXIS(NM+1)
PTDEF1 = POINTF/POINTK
151 WRITE(3,208)POINTF,UT3,PTDEF1,UT1
208 FORMAT(/T5,'THE POINT DEFL DUE TO',F12.4,1X,A4,' IS',F12.7,1X,
1A2/)
L = 1
DO 37 I = 1,NM
IF(IPRD.LE.0.AND.IPAXIS.LT.0.)FRIC(I) = -FRIC(I)
IF(PHOLDV.EQ.0..AND.PHOLDH.EQ.0..AND.IPRD.GT.0.)GO TO 41
IF(IPRD.GT.0.AND.I.EQ.1)GO TO 36
IF(IPRD.GT.0)GO TO 38
IF(IPRD.LE.0)GO TO 39
36 P(1) = PHOLDV
P(2) = PHOLDH
38 P(L+3) = PAXIS(I+1)*XSIN
P(L+4) = PAXIS(I+1)*XCOS
GO TO 37
39 IF(I.GT.1)GO TO 35
P(1) = PAXIS(NM+1)*XSIN
P(2) = PAXIS(NM+1)*XCOS
P(L+3) = P(1)-FRIC(I)*XSIN
P(L+4) = P(2)-FRIC(I)*XCOS
GO TO 37
35 P(L+3) = P(L)-FRIC(I)*XSIN
P(L+4) = P(L-1)-FRIC(I)*XCOS
GO TO 37
C THIS BRANCH TAKES CARE OF PILE WITH MOMENT ONLY
41 P(L+3) = 0.
P(L+4) = 0.
37 L = L+3
C ***** APPLY P-DELTA EFFECT
IF(NDELT.LE.0)GO TO 158
LK=0
DO 924 KI=1,JTSOIL
P(LK+3) = -(X(2,1) - X(LK+2,1))*P(1)
924 LK=LK+3
158 WRITE(3,906)UT2,UT5
906 FORMAT(///,T4,'NM',2X,'SLIP,',A2,2X,'SHEAR,',A7,6X,
1'P-MATRIX IN 3-COLS')
907 IP1 = 1
DO 74 I = 1,NM
IP2 = IP1+1
IP3 = IP1+2
WRITE(3,893)I,SLIP(I,1),SS(I),IP1,P(IP1),IP2,P(IP2),IP3,P(IP3)
893 FORMAT(T3,I3,F10.6,2X,F10.5,3X,I2,F10.3,2X,I2,F10.3,2X,I2,F10.3)
74 IP1 = IP3+1
NMP2 = NP-2
WRITE(3,895)(IM,P(IM),IM=NMP2,NP)
895 FORMAT(T31,I2,F10.3,2X,I2,F10.3,2X,I2,F10.3)
JJJ = JJJ+1
IF(JJJ.LE.2)GO TO 1120
C TEST FOR SLIP CONVERGENCE-----
KCOUN = 0
DO 58 I = 1,NM
SLIPCH = SLIP(I,1)-SLIP(I,2)
58 IF(ABS(SLIPCH).LE.0.008)KCOUN = KCOUN +1
IF(JJJ.GT.7)GO TO 77
1120 DO 896 J = 1,NM
X(J,2) = X(J,1)

```

```

      SLIP(J,2) = SLIP(J,1)
896 XMOD(J,2) = XMOD(J,1)
      PTDEF2 = PTDEF1
      IF(JJJ.LE.2.OR.KCOUN.LT.NM)GO TO 2000
      IF(ABS(X(2,1)-XPDEL).GT.0.020.AND.NDEL.T.GT.0)GO TO 2000
77 II = II+1
      JJJ = JJJ-1
      WRITE(3,170)JJJ
170 FORMAT('1',///,T5,'THE FINAL COMPUTED PILE ELEMENT FORCES AND
1 OTHER DATA AFTER',I2,' ITERATIONS FOLLOWS')
      WRITE(3,59) UT1
59 FORMAT(//,T5,'MEMNO',5X,'END MOMENTS',10X,'AXIAL FORCE',8X,'SOIL
1 REACTIONS',3X,'ELEM.DEFL,',A2,4X,'SOIL SPRONGS')
      GO TO 8000
C   CYCLE TO FIND PILE ELEMENT FORCES AS F = SAT*X
605 DO 851 I = 1,6
      F(I) = 0.
      DO 851 K = 1,6
      N = NPE(IP,K)
      IF(IP.LT.NM)XPER1 = XL(IP)/(XL(IP)+XL(IP+1))
      IF(IP.GT.1)XPER2 = XL(IP)/(XL(IP-1)+XL(IP))
      XMOD(N,1) = X(N,1)
      IF(I.LE.2)GO TO 851
      IF(I.GE.5)GO TO 851
      IF(K/3*.EQ.K)GO TO 851
849 IF(IP.EQ.1.AND.K.LE.3)GO TO 851
      IF(IP.EQ.1.AND.K.GT.3)XMOD(N,1)=X(N,1)*XPER1
      IF(IP.GT.1.AND.K.LT.3)XMOD(N,1) = X(N,1)*XPER2
      IF(IP.GT.1.AND.IP.NE.NM.AND.K.GT.3)XMOD(N,1)=X(N,1)*XPER1
851 F(I) = F(I) + ESAT(I,K)*XMOD(N,1)
      SUMH = SUMH + (F(5)+F(6))*XSIN
      WRITE(3,62)IP,(F(I),I=1,6),SUMDX(IP),SSPR1,SSPR2
62 FORMAT(T5,I5,6F10.3,F12.5,2X,2F12.3)
      IF(IP.EQ.NM)GO TO 609
      GO TO 205
609 WRITE(3,63)SUMH,UT3
63 FORMAT(//T10,'SUM HOR. SOIL REACTIONS =',F10.2,1X,A4)
      DELV = SUMDX(1)*XSIN*FU1
      DELH=X(2,1)*FU1
      ROT = X(3,1)
      WRITE(3,175)DELV,UT2,DELH,UT2,ROT
175 FORMAT(//T15,'PILE TOP MOVEMENTS: VERT =',F10.5,1X,A2/ T36,
1'HORZ=',F10.5,1X,A2/ T37,'ROT =',F10.5,' RAD =)
      POINTF = F(4)/XSIN
      WRITE(3,174)P11B,UT3,P21B,UT3,P31B,UT4,POINTF,UT3
174 FORMAT(//T5,'***** THE ULTIMATE PILE RESISTANCE =',F12.4,1X,A4,
1' VERTICAL AND',F9.3,1X,A4,' HORIZ'/ T12,'THE ORIGINAL MOMENT APPL
2IED =',F12.4,1X,A4/ T15,'POINT FORCE = ',F12.3,1X,A4)
      IF(IPRD.LE.0)WRITE(3,241)
241 FORMAT(T15,'***PILE RESISTANCE IS COMPUTED')
      JCOUN = JCOUN+1
      IF(JCOUN.GT.NLC)GO TO 7000
      IF(NLC.GT.1)READ(1,102)POINTX
      WRITE(3,7701)JCOUN,POINTX,UT1
7701 FORMAT(//T10,'CURRENT PROB NO =',I3,3X,'POINTX =',F10.6,1X,A4)
      GO TO 7500
6000 STOP
      END

```

(BOWLES, 1974)

## **ANEXO B**

### **MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL DEL SISTEMA**

**MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL KT**

$\frac{4EI}{L_1}$	$\frac{6EI}{L_1^2}$	$\frac{2EI}{L_1}$	$-\frac{6EI}{L_1^2}$	0	0	0	0	0	0	...	0
$\frac{6EI}{L_1^2}$	$\frac{12EI}{L_1^3}$	$\frac{6EI}{L_1^2}$	$-\frac{12EI}{L_1^3}$	0	0	0	0	0	0	...	0
$\frac{2EI}{L_1}$	$\frac{6EI}{L_1^2}$	$\frac{4EI}{L_1} + \frac{4EI}{L_2}$	$-\frac{6EI}{L_1^2} + \frac{6EI}{L_2^2}$	$\frac{2EI}{L_2}$	$-\frac{6EI}{L_2^2}$	0	0	0	0	...	0
$-\frac{6EI}{L_1^2}$	$-\frac{12EI}{L_1^3}$	$-\frac{6EI}{L_1^2} + \frac{6EI}{L_2^2}$	$\frac{12EI}{L_1^3} + \frac{12EI}{L_2^3} + K_2$	$\frac{6EI}{L_2^2}$	$-\frac{12EI}{L_2^3}$	0	0	0	0	...	0
0	0	$\frac{2EI}{L_2}$	$\frac{6EI}{L_2^2}$	$\frac{4EI}{L_2} + \frac{4EI}{L_3}$	$-\frac{6EI}{L_2^2} + \frac{6EI}{L_3^2}$	$\frac{2EI}{L_3}$	$-\frac{6EI}{L_3^2}$	0	0	...	0
0	0	$-\frac{6EI}{L_2^2}$	$-\frac{12EI}{L_2^3}$	$-\frac{6EI}{L_2^2} + \frac{6EI}{L_3^2}$	$\frac{12EI}{L_2^3} + \frac{12EI}{L_3^3} + K_3$	$\frac{6EI}{L_3^2}$	$-\frac{12EI}{L_3^3}$	0	0	...	0
0	0	0	0	$\frac{2EI}{L_3}$	$\frac{6EI}{L_3^2}$	$\frac{4EI}{L_3} + \frac{4EI}{L_4}$	$-\frac{6EI}{L_3^2} + \frac{6EI}{L_4^2}$	$\frac{2EI}{L_4}$	$-\frac{6EI}{L_4^2}$	...	0
0	0	0	0	$-\frac{6EI}{L_3^2}$	$-\frac{12EI}{L_3^3}$	$-\frac{6EI}{L_3^2} + \frac{6EI}{L_4^2}$	$\frac{12EI}{L_3^3} + \frac{12EI}{L_4^3} + K_4$	$\frac{6EI}{L_4^2}$	$-\frac{12EI}{L_4^3}$	...	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0	0	0	0	...	0	$\frac{2EI}{L_{N-2}}$	$\frac{6EI}{L_{N-2}^2}$	$\frac{4EI}{L_{N-2}} + \frac{4EI}{L_{N-1}}$	$-\frac{6EI}{L_{N-2}^2} + \frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$\frac{2EI}{L_{N-1}}$	$-\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$
0	0	0	0	...	0	$-\frac{6EI}{L_{N-2}^2}$	$-\frac{12EI}{L_{N-2}^3}$	$-\frac{6EI}{L_{N-2}^2} + \frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$\frac{12EI}{L_{N-2}^3} + \frac{12EI}{L_{N-1}^3} + K_{N-1}$	$\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$-\frac{12EI}{L_{N-1}^3}$
0	0	0	0	...	0	0	0	$\frac{2EI}{L_{N-1}^2}$	$\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$\frac{4EI}{L_{N-1}}$	$-\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$
0	0	0	0	...	0	0	0	$\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$-\frac{12EI}{L_{N-1}^3}$	$-\frac{6EI}{L_{N-1}^2}$	$\frac{12EI}{L_{N-1}^3}$

# **ANEXO C**

## **TEST DE PENETRACION STANDARD**

## TEST DE PENETRACION STANDARD STP

Según Gunaratne (2006), el autor R. H. Perry en 1977 en su investigación “Estimating bearing capacity of sand from STP values, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(GT9): 1014 – 1019”, determinó lo siguiente:

- Con las expresiones de capacidad de resistencia de una zapata extendida en un suelo cohesivo, se determina:

$$q = 30N_{55} \left( \frac{s}{25.4} \right)$$

Donde:

- $N_{55}$  : Corrección de penetración standard correspondiente a una eficiencia del 55% en el golpe del martillo o martinete
- s: Ajuste en milímetros (B/L)

- Del STP, se obtiene una correlación estimativa y equivalente al ángulo de fricción interna  $\Phi$  del suelo, aplicando la siguiente ecuación:

$$\phi = 25 + 28 \left( \frac{N_{55}}{q} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- q: Estrés efectivo de sobrecarga en la evaluación.

En lo que corresponde al punto 5.1.1.1 Problema 1, la determinación del ángulo de fricción interna, se realiza de la siguiente forma:

De los datos entregados, se utiliza por criterio del autor, el valor de  $N= 15$ , y utilizando  $s= 8,2$  mm, se obtiene lo siguiente:

$$q = 30 * 15 \left( \frac{8.2}{25.4} \right) = 145$$

Luego, aplicando la segunda ecuación, se tiene:

$$\phi = 25 + 28 \left( \frac{15}{145} \right)^{\frac{1}{2}} = 34$$

En donde el ángulo de fricción interna obtenido es  $\Phi = 34^\circ$ , con cuyo valor se ingresa en la tabla 1 de este proyecto para obtener  $N_q$ ,  $N_c$  y  $N_\gamma$ .

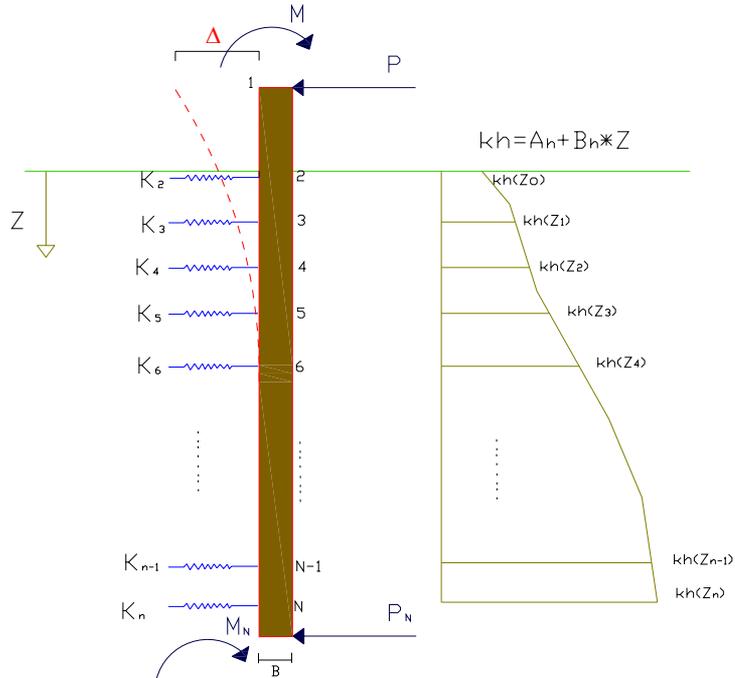
# **ANEXO D**

## **PROGRAMAS FINALES**

**“LATERAL PILES” y “STATIC PILES”**

# LATERAL PILES

Este programa calcula la deformación máxima y la distribución de reacciones en un pilote, producida por una fuerza solicitante lateral aplicada en su extremo superior.  
Este programa utiliza el método de elementos finitos para encontrar una matriz de rigidez  $KT$  global del sistema generada por la división del pilote en  $N$  nodos.



## Propiedades del Pilote

Largo total del elemento

$L_1$   m

Longitud externa superior

$L_1$   m

Modulo de elasticidad

$E$    $KPa$

Carga lateral

$P$    $KN$

Diámetro del pilote

$B$   m

Longitud de último elemento

$L_N$   m

inercia del elemento

$I$    $m^4$

Nº de nodos

$N$

## Propiedades del Suelo

Propiedades indice Según tabla 1

$N_\gamma$

$N_c$

$Fw1$

$Cm$

Cohesión

$c$

$N_q$

$Fw2$

$C$    $KN/m^3$

Densidad del suelo

$\gamma$    $KN/m^3$

Para modulo de rigidez horizontal del suelo constante  $n$

$kh$    $kN/m^3$

→TABLA 1 – Factores de capacidad según Terzagui y Vesic

→Determinación del coeficiente de rigidez del suelo  $kh$

→Determinación de la rigidez  $K_t$  del elemento

→Ver valores de  $Z$ ,  $kh$  y  $K_t$

→Generación de matriz  $KT$

→ $KT=$

→Resultados finales – Criterio de verificación

$\Delta = -0.303 \quad \text{m}$  Desplazamiento generado en la cabeza superior del pilote

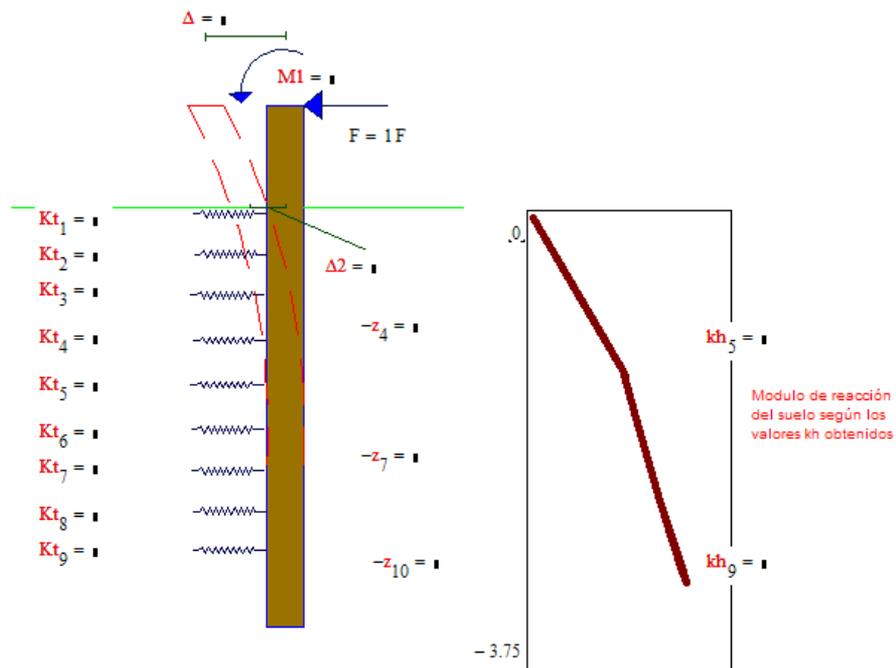
$\Delta 2 = 0.248 \quad \text{m}$  Desplazamiento del pilote a nivel del terreno

$M1 = -16 \quad \text{kN} \cdot \text{m}$  Momento recuperador generado en la cabeza superior del pilote

**Desplazamiento = "Ok"**

Si el desplazamiento no cumple, se debe redimensionar el pilote hasta que su desplazamiento máximo generado por la fuerza solicitante  $F$ , sea menor que su desplazamiento máximo  $\delta$ .

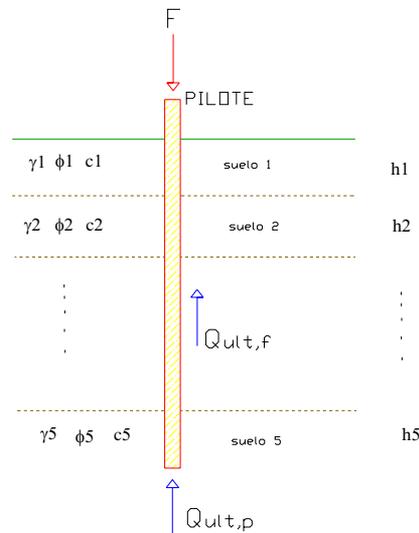
Si los resultados de desplazamiento son positivos y de valores excesivos, existe una sobredimensión del pilote, ante lo cual se pueden disminuir las dimensiones de este, o bien, puede dejarse tal cual.



## STATIC PILES

Este programa Verifica el diseño de un pilote a través de la Capacidad Resistente por punta y por fricción, para un suelo de hasta 10 capas, y una fuerza axial solicitante  $F$ , tal como se indica en la figura.

Se deben ingresar los datos que se piden a continuación, seleccionando el número de capas para luego agregar la estratigrafía correspondiente a las capas del suelo



### Datos del Pilote

Material del pilote

Hormigon

Largo total del pilote

L 30 m

Solicitación axial del pilote

F 30 ton

Si el pilote es de un perfil de acero se debe ingresar el área y el perímetro de la sección

Densidad del material

$\gamma$  2.4 ton/m<sup>3</sup>

diametro del pilote

d 0.30 m

Factor de Seguridad

3

As 0 m<sup>2</sup>

p 0 m

Sección del pilote

Cuadrado

### Datos del suelo

Nº de capas del suelo

3

Ver tabla 1 (valores recomendados)  
Valores correspondientes al ángulo de fricción interna de la última capa del suelo

Nc 30

Nq 28

→TABLA 1- valores recomendados por Vesic para Nc y Nq

→Ingreso de estratigrafía del suelo:

Altura de Capas del suelo en m.	Angulo de fricción interna.	Cohesión del suelo en kg/cm <sup>2</sup>	Densidad del suelo en T/m <sup>3</sup>	Tipo de suelo en cada capa
h <sub>1</sub> 13.7	φ <sub>1</sub> 21.8	c <sub>1</sub> 0.10	γ <sub>1</sub> 1.663	Fino (arcilla)
h <sub>2</sub> 2	φ <sub>2</sub> 32	c <sub>2</sub> 0	γ <sub>2</sub> 1.853	Granular (arena)
h <sub>3</sub> 5.75	φ <sub>3</sub> 38	c <sub>3</sub> 0	γ <sub>3</sub> 2.085	Granular (arena)
h <sub>4</sub> 13.85	φ <sub>4</sub> 24.9	c <sub>4</sub> 0.16	γ <sub>4</sub> 1.673	Granular (arena)
h <sub>5</sub> 0	φ <sub>5</sub> 0	c <sub>5</sub> 0	γ <sub>5</sub> 0	Granular (arena)
h <sub>6</sub> 0	φ <sub>6</sub> 0	c <sub>6</sub> 0	γ <sub>6</sub> 0	Granular (arena)
h <sub>7</sub> 0	φ <sub>7</sub> 0	c <sub>7</sub> 0	γ <sub>7</sub> 0	Granular (arena)
h <sub>8</sub> 0	φ <sub>8</sub> 0	c <sub>8</sub> 0	γ <sub>8</sub> 0	Granular (arena)
h <sub>9</sub> 0	φ <sub>9</sub> 0	c <sub>9</sub> 0	γ <sub>9</sub> 0	Granular (arena)
h <sub>10</sub> 0	φ <sub>10</sub> 0	c <sub>10</sub> 0	γ <sub>10</sub> 0	Granular (arena)

**Cálculo y desarrollo:**

→Cálculo de Ko y q, capacidad de soporte por punta:

$$q = \text{Qult}_p =$$

→Cálculo de la capacidad de soporte por fricción:

→Valores finales para la determinación de la capacidad de soporte por fricción

$$\text{Qult}_f =$$

→ Criterio final de diseño

**Pp** = Peso propio total del pilote

**Qult<sub>t</sub>** = Capacidad última de resistencia admisible total en el pilote

**Qsol** = Carga axial solicitante Mayorada

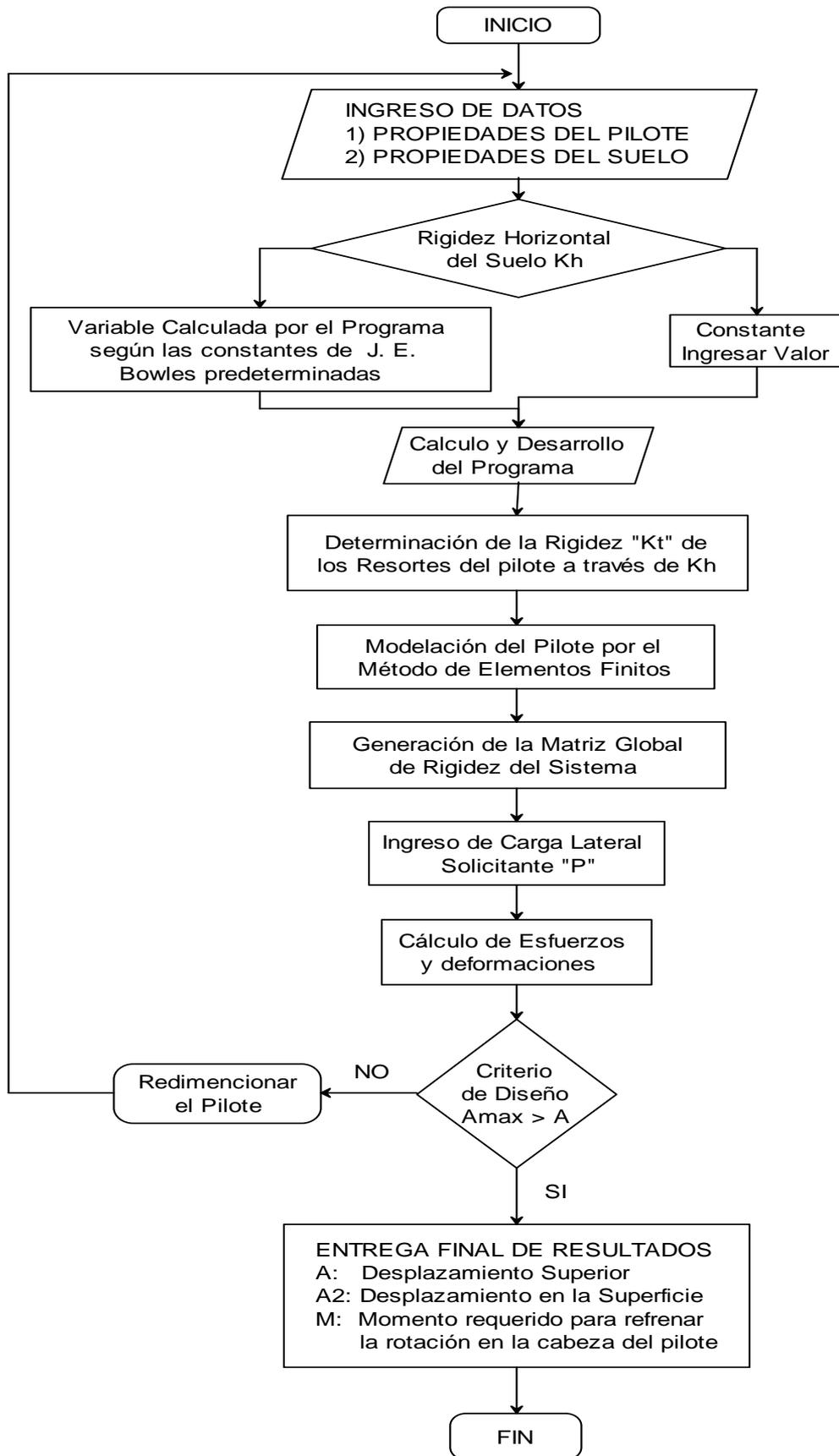
**Criterio** = “ \_\_\_ ” Criterio final de diseño, si este "No cumple", se debe redimensionar el pilote hasta que el criterio sea "Ok".

# **ANEXO E**

## **DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROGRAMACION**

### **“LATERAL PILES” y “STATIC PILES”**

## DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN DE “LATERAL PILES”



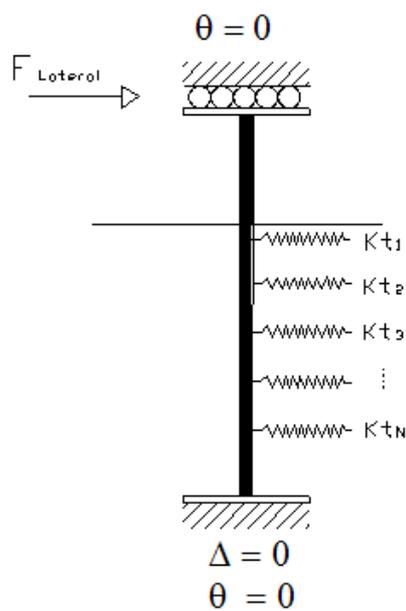
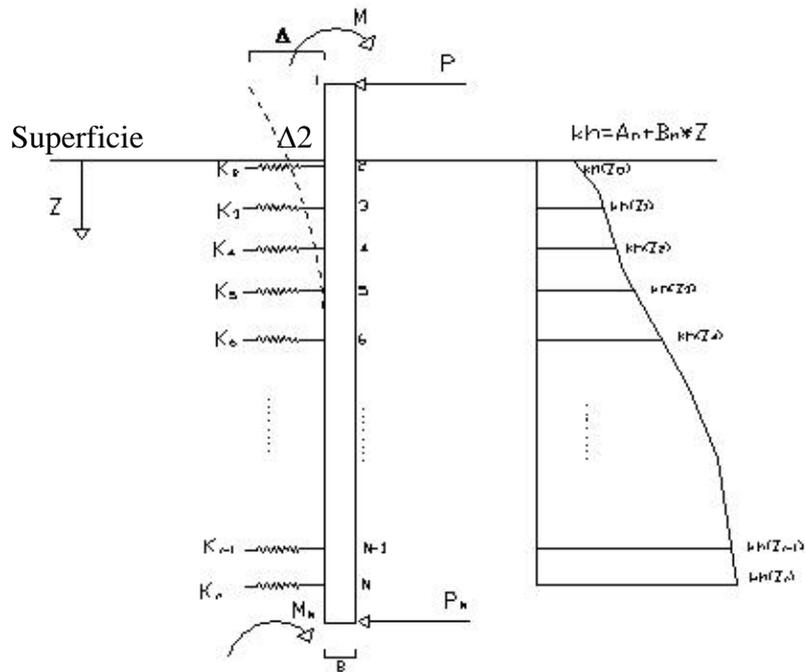
**1) Propiedades del Pilote:**

- **Lt:** Largo total
- **B:** Diámetro
- **I:** Inercia
- **E:** Módulo de elasticidad
- **Amax:** Desplazamiento máx. permitido  
En la cabeza del pilote

**2) Propiedades del Suelo:**

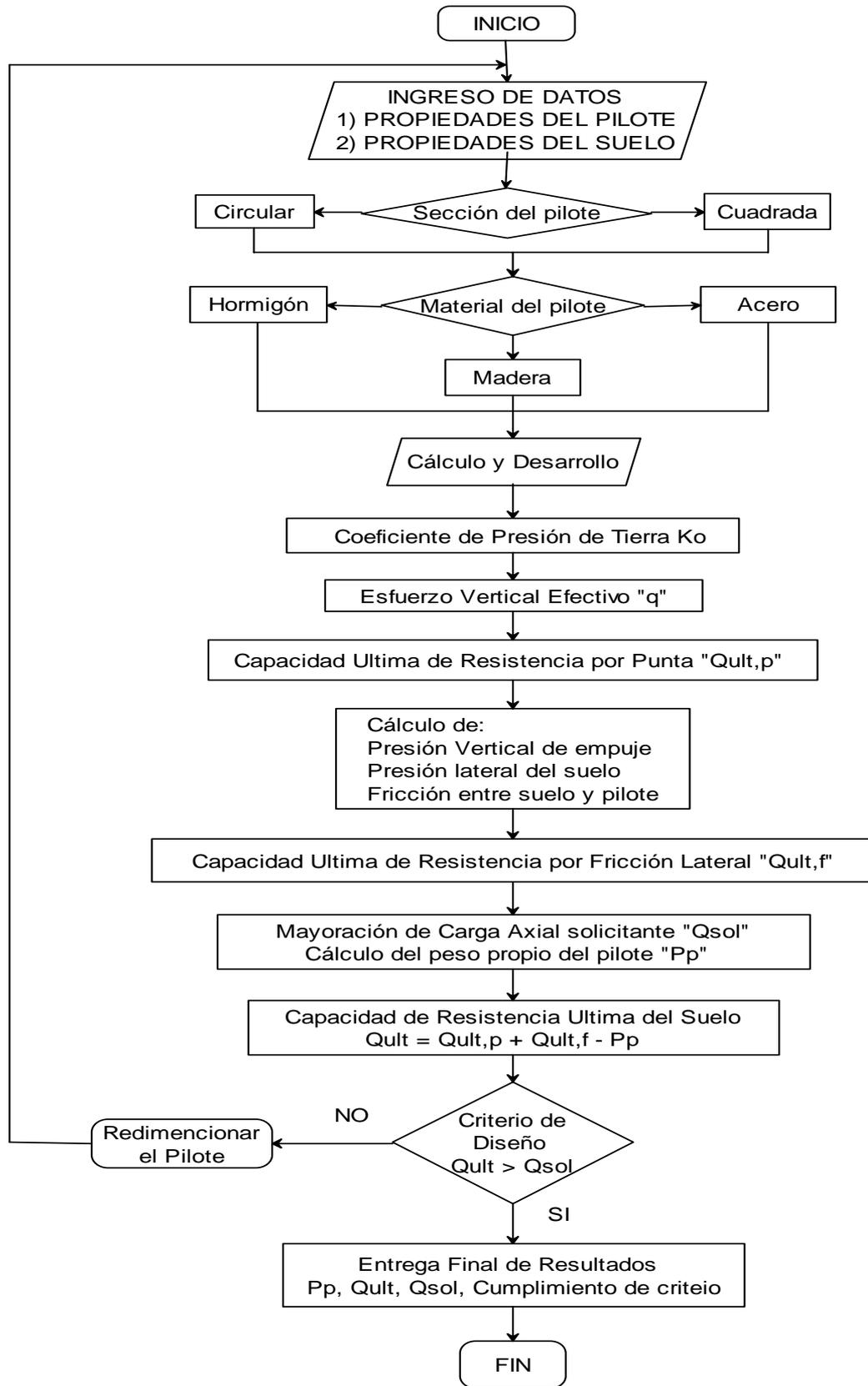
- **Propiedades Índice:**  $N_c, N_q, N_\gamma$
- $\gamma$ : Densidad del suelo
- **c:** Cohesión del suelo

**Nota:**  $A = \Delta$ ;  $y = \gamma$



**Modelamiento del Pilote  
Empotrado Fijo – Empotrado Movil**

## DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN DE "STATIC PILES"



**1) Propiedades del Pilote:**

- **Lt**: Largo total
- **B**: Diámetro
- $\gamma$ : Densidad del material
- **P**: Solicitación axial.
- **FS**: Factor de seguridad

**2) Propiedades del Suelo (estatigrafía):**

- **N°** de capas del suelo
- **h**: altura de cada capa
- $\Phi$ : ángulo de fricción interna
- **c**: cohesión del suelo por capa
- $\gamma$ : densidad saturada del suelo
- **Propiedades Índice**:  $N_q$ ,  $N_c$

