

INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ A LA FLEXIÓN DEL PILOTE SOBRE LAS CURVAS P-Y DE SUELOS ARENOSOS

Por

Sixto F. Fernández Valdez

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimiento para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS
en
INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
CAMPUS DE MAYAGÜEZ
DICIEMBRE 2009

Aprobado por:

Miguel A. Pando, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Ricardo Ramos, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Luis E. Suárez, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Basir Shafiq, Ph.D.
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Ismael Pagán Trinidad, MSCE
Director del Departamento de Ingeniería Civil
y Agrimensura

Fecha

ABSTRACT

The laterally loaded pile problem involves a fourth order differential equation, where a complex relationship between the lateral deflections of the pile and the reactions generated by the surrounding soil take place. A common method of solution for this problem is by using numerical methods like the finite difference technique, where the soil reactions are modeled using springs with non-linear constitutive relationships denominated p-y curves. Conventional Geotechnical practice usually use empirical p-y curves published in the literature. In all these empirical p-y curves, the soil reaction is related to the soil properties, stress levels, and the pile width. In other words, according to these p-y curves the soil reactions are not dependant on pile properties like pile cross sectional shape and flexural stiffness (EI). The flexural stiffness (EI) affects directly the deflected shape of the pile and the shape and extension of the failure zone of the soil around the pile. The principal objective of this thesis is to evaluate the influence of the pile flexural stiffness on the reactions that are generated on the soil. Specifically, an analytical study of the influence of the pile flexural stiffness on the reactions that are generated on the soil using the SWM software base con the Strain Wedge model was carried out. A parametric study and also an analysis of 3 lateral load test of the Hampton, Virginia case history were carried. In both components of this thesis only sandy soils without cohesion were considered. The results of this study demonstrate that the pile flexural stiffness is an important pile property that influences the soil reactions. It was found that the pile flexural stiffness influence mainly the reactions generated in medium dense to dense sandy soils.

RESUMEN

El problema de pilotes bajo carga lateral envuelve una ecuación diferencial de cuarto orden donde entra en juego una compleja relación entre las deformaciones laterales del pilote y las reacciones generadas por el suelo. Este problema suele resolverse mediante métodos numéricos como el de diferencias finitas donde las reacciones del suelo se modelan mediante resortes con una relación constitutiva no lineal denominada curvas p-y. La práctica geotécnica convencional actual usualmente utiliza curvas p-y de la literatura. En todas estas curvas p-y empíricas la reacción del suelo está relacionada a las propiedades del suelo, el nivel de esfuerzos y el ancho del pilote. Es decir, las reacciones del suelo según estas curvas p-y no dependen de propiedades del pilote como la forma de su sección transversal o su rigidez a la flexión (EI). La rigidez a la flexión (EI) influye en la forma de la deformada del pilote y en la forma y extensión de la zona de falla del suelo que rodea el pilote. Esta tesis tiene como objetivo evaluar la influencia de la rigidez a la flexión del pilote en las reacciones que se generan en el suelo. Específicamente se realizó un estudio analítico de la influencia de la rigidez a la flexión en las reacciones generadas en el suelo utilizando el programa SWM que se basa en el método de la cuña de deformación. Se realizó un estudio paramétrico y también se analizaron 3 pruebas de carga lateral de un caso histórico de Hampton, Virginia. En ambos componentes de esta tesis solo se consideró el caso de suelos arenosos sin cohesión. Los resultados de este estudio demuestran que la rigidez a la flexión del pilote es una propiedad importante que influye en las reacciones del suelo. Se encontró que la rigidez a la flexión del pilote influye mayormente en las reacciones generadas en suelos arenosos de estado medio denso a denso.

A mi madre, Gregoria Valdez
A mi padre, Sixto Fernández
A mi hermana, Sarah Fernández

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco infinitamente al Dr. Miguel Pando, consejero y presidente del comité graduado por guiarme y orientarme a través de todo este proceso. También le doy gracias por su apoyo incondicional, sus excelentes consejos y principalmente por creer en mí. Gracias por ser una excelente persona y por brindarme su amistad.

También agradezco a los miembros del comité graduado Dr. Ricardo Ramos y Dr. Luis Suárez. Sus ideas y aportes fueron muy valiosos para esta investigación y principalmente para mi crecimiento profesional.

Parte de mis estudios fueron financiados por ayudantías institucionales provenientes del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, del Decanato de Ingeniería de la Universidad de Puerto Rico, y de fondos provenientes del programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico presidido por el Dr. Martínez Cruzado. Estoy sinceramente agradecido por esta ayuda económica brindada. Sin ella, no hubiera sido posible completar esta maestría.

Deseo expresar mi gratitud a mis compañeros de clase y amigos (Carolina Paredes, Javier Osorio, Melkin Fructuoso, Cesar Ramirez, Anibal Mercado, Alesandra Morales, Yaurel Guadalupe, Omar Esquilin, Ruth Dendadearena, Raul Rita y muchos más) que siempre confiaron en mí y me dieron la mano cuando lo necesitaba.

Finalmente, quiero agradecer a mi padre Sixto Fernández, a mi madre Gregoria Valdez y a mi hermana Sarah Fernández, por siempre brindarme el apoyo necesario para seguir adelante, por proporcionarme el calor de familia aun cuando estaban lejos, por creer en mí y principalmente por siempre pensar que puedo lograr cualquier cosa que me proponga. Gracias a su formación y su empeño he podido completar este paso tan importante en mi vida. Sin ustedes, esto no hubiera sido posible. Los amo.

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 2-1. Distribución de los esfuerzos alrededor del pilote (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).	7
Figura 2-2. Forma típica de una curva p-y.....	8
Figura 2-3. Solución típica del problema de pilotes cargados lateralmente	8
Figura 2-4. Esquemático del modelado del suelo en el método de las curvas p-y (adaptado de Pando 2003).	12
Figura 2-5. Curva p-y esquemática (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).....	13
Figura 2-6. Curvas p-y de la literatura de acuerdo al tipo de suelo.	14
Figura 2-7. Curvas p-y para pilotes de diferentes diámetros determinadas a la misma profundidad.	15
Figura 2-8. Forma característica de una curva p-y para arenas por encima y por debajo del nivel freático (adaptado de Reese et al. 1974).	16
Figura 2-9. Valores del coeficiente A para carga estática (adaptado de Reese et al. 1974).....	18
Figura 2-10. Valores de la constante B para carga estática (adaptado de Reese et al. 1974).	18
Figura 2-11. Curvas p-y de Reese et al. (1974) a diferentes profundidades.	19
Figura 2-12. Posibles secciones transversales de pilotes de diversos EI donde aplicar curvas p-y Fig. 2-11.....	20
Figura 2-13. Coeficientes en función del ángulo de fricción interna del suelo (adaptado de API 1987).	22
Figura 2-14. Coeficiente horizontal de subrasante en función de la densidad relativa y el ángulo de fricción interna del suelo (adaptado de API 1987).....	22
Figura 2-15. Comparación entre las curvas p-y de Reese y de API a la misma profundidad.....	23
Figura 2-16. Configuración básica de la cuña pasiva para un suelo uniforme (adaptado de Ashour et al. 1998a).....	24
Figura 2-17. Deflexión lateral real comparada con idealización lineal para un pilote de cabeza libre cargado lateralmente (adaptado de Norris 1986).....	26
Figura 2-18. Distribución de las reacciones del suelo por unidad de longitud del pilote sobre la forma deflectada del pilote (adaptado de Ashour y Norris 2000).....	27
Figura 2-19. Curva p-y característica en el MCD (adaptado de Ashour y Norris 2000).....	30
Figura 2-20. Efecto del EI del pilote en la respuesta del suelo a una profundidad de 1.83 m en el suelo del sitio de prueba de la isla Mustang, Texas (adaptado de Ashour y Norris 2000).	38

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 2-21. Efecto del EI del pilote en la respuesta del suelo a una profundidad de 0.915 m en el suelo del sitio de prueba del rio Sabine, Texas (adaptado de Ashour y Norris 2000).	39
Figura 2-22. Curvas p-y para distintos EI determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Fan y Long 2005).	42
Figura 2-23. Curvas p-y para distintos EI determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Fan y Long 2005).	42
Figura 2-24. Curvas p-y para distintas rigideces de contacto determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Xiao y Wang 2007).	43
Figura 3-1. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena suelta.	50
Figura 3-2. Curvas p-y en arena suelta para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	52
Figura 3-3. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.	54
Figura 3-4. Curvas p-y en arena medianamente densa para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	55
Figura 3-5. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena densa.	57
Figura 3-6. Curvas p-y en arenas densas para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	58
Figura 3-7. Degradación del EI con la carga aplicada para dos pilotes hipotéticos.	59
Figura 3-8. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena suelta.	61
Figura 3-9. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena suelta.	61
Figura 3-10. Curvas p-y en arenas sueltas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	63
Figura 3-11. Curvas p-y en arenas sueltas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	64
Figura 3-12. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.	65

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 3-13. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.	65
Figura 3-14. Curvas p-y en arenas medianamente densas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.....	67
Figura 3-15. Curvas p-y en arenas medianamente densas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.....	68
Figura 3-16. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena densa.	70
Figura 3-17. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena densa.	70
Figura 3-18. Curvas p-y en arenas densas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	72
Figura 3-19. Curvas p-y en arenas densas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.	73
Figura 4-1. Esquema de la distribución de los sensores medidores de deformación utilizado en el pilote de prueba de la isla Mustang (adaptado de Reese y Van Impe 2001).	76
Figura 4-2. Procedimiento paso por paso para determinar momentos desde datos de deflexión lateral provenientes de mediciones de inclinómetro.	81
Figura 4-3. Deflectada de los pilotes hipotéticos para diferentes cargas laterales.....	84
Figura 4-4. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso A para dos diferentes niveles de carga lateral.	85
Figura 4-5. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso B para dos diferentes niveles de carga lateral.	85
Figura 4-6. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso A.....	87
Figura 4-7. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso B.	88
Figura 4-8. Relaciones no lineales del material del pilote utilizado en el análisis.	90
Figura 4-9. Deflectada de los pilotes hipotéticos para diferentes cargas laterales.....	92
Figura 4.10. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso A para dos diferentes niveles de carga lateral.	93

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 4.11. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso B para dos diferentes niveles de carga lateral.	93
Figura 4-12. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso A.	95
Figura 4-13. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso B.	96
Figura 5-1. Secciones transversales de los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).	100
Figura 5-2. Diagramas de esfuerzo deformación de los materiales que conforman los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).	103
Figura 5-3. Características de la rigidez a la flexión de los tres pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).	105
Figura 5-4. Mapa de localización del sitio de prueba (adaptado de Pando 2003).	105
Figura 5-5. Estratigrafía geotécnica del área cercana al sitio de prueba de los pilotes (adaptado de Pando 2003).	107
Figura 5-6. Ubicación de los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).	109
Figura 5-7. Arreglo del pilote de PSC al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.	110
Figura 5-8. Arreglo del pilote de FRP al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.	110
Figura 5-9. Arreglo del pilote de PPI al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.	111
Figura 5-10. Fotografía de los pilotes de PSC y FRP recién finalizada el proceso de la hincada de los pilotes (Pando 2003).	113
Figura 5-11. Deflexión lateral medida en la superficie del terreno para los tres pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).	115
Figura 5-12. Forma deflectada de los pilotes para diferentes niveles de carga lateral.	117
Figura 6-1. Variación del SPT con la profundidad para el barreno localizado en el extremo sur del sitio de prueba de Hampton, Virginia (adaptado de Pando 2003).	123
Figura 6-2. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales bajos.	124
Figura 6-3. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales intermedios.	125
Figura 6-4. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales altos.	125

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 6-5. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a diferentes niveles de carga lateral.	128
Figura 6-6. Variación del SPT con la profundidad para el barreno localizado en el extremo norte del sitio de prueba de Hampton, Virginia (adaptado de Pando 2003).	130
Figura 6-7. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales bajos.	132
Figura 6-8. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales intermedios.	132
Figura 6-9. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales altos.	133
Figura 6-10. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a diferentes niveles de carga lateral.	135
Figura 6-11. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales bajos.	137
Figura 6-12. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales intermedios.	138
Figura 6-13. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales altos.	138
Figura 6-14. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a diferentes niveles de carga lateral.	141
Figura 6-15. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales bajos.	144
Figura 6-16. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales intermedios.	145
Figura 6-17. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales altos.	145
Figura 6-18. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a diferentes niveles de carga lateral.	148

LISTA DE FIGURAS

Titulo	No.
Figura 6-19. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales bajos.	150
Figura 6-20. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales intermedios.....	150
Figura 6-21. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales altos.	151
Figura 6-22. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a diferentes niveles de carga lateral.....	154
Figura 6-23. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales bajos.....	156
Figura 6-24. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales intermedios.	156
Figura 3-25. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales altos.	157
Figura 6-26. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a diferentes niveles de carga lateral.....	160
Figura 6-27. Curvas p-y determinadas utilizando LIPLÉ para los 3 pilotes de prueba a diferentes profundidades.....	162
Figura 6-28. Curvas p-y determinadas utilizando SWM para los 3 pilotes de prueba a diferentes profundidades.....	164
Figura 6-29. Curvas p-y determinadas utilizando SWM para los 3 pilotes de prueba utilizando los mismos valores de ϵ_{50} para los 3 pilotes a una profundidad de 2.91 m.	166
Figura 6-30. Curvas p-y determinadas utilizando la metodología propuesta en el Capítulo 4 para los 3 pilotes de prueba a una profundidad de 2.91 m.....	167

LISTA DE TABLAS

Titulo	No.
Tabla 2-1. Curvas p-y empíricas comúnmente utilizadas para distintos suelos o rocas.	13
Tabla 2.2. Valores de k_{py} para arenas según Reese y Van Impe (2001).	18
Tabla 2-3. Casos históricos analizados con el MCD (adaptado de Ashour et al. 1998a).	25
Tabla 2-4. Recomendaciones de Terzaghi para el valor de k en arenas (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).	34
Tabla 2-5. Valores experimentales de la constante m (adaptado de Yoshida y Yoshinaka 1972).	35
Tabla 3-1. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena suelta.	49
Tabla 3-2. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena medianamente densa.	53
Tabla 3-3. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena densa.	56
Tabla 3-4. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena suelta.	60
Tabla 3-5. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena medianamente densa.	64
Tabla 3-6. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena densa.	69
Tabla 4-1. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el análisis con LPILE de los pilotes con EI constante.	83
Tabla 4-2. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el análisis con LPILE para los pilotes con EI variables.	91
Tabla 6-1. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PSC con LPILE.	122
Tabla 6-2. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de PSC del tipo R = Medido/Calculado.	127
Tabla 6-3. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de FRP con LPILE.	131
Tabla 6-4. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de FRP del tipo R = Medido/Calculado.	134

LISTA DE TABLAS

Titulo	No.
Tabla 6-5. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PPI con LPILE.	136
Tabla 6-6. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de PPI del tipo R = Medido/Calculado.....	140
Tabla 6-7. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PSC con SWM.	143
Tabla 6-8. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de PSC del tipo R = Medido/Calculado.....	147
Tabla 6-9. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de FRP con SWM.	149
Tabla 6-10. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de FRP del tipo R = Medido/Calculado.....	153
Tabla 6-10. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PPI con SWM.	155
Tabla 6-11. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de PPI del tipo R = Medido/Calculado.....	159

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La mayoría de las estructuras están sujetas a distintas combinaciones de carga y solicitaciones que muchas veces resultan en transmisión de grandes cargas de compresión, tensión y laterales al suelo de fundación. Muchas veces el suelo de fundación no presenta las propiedades o condiciones necesarias para poder resistir estas cargas utilizando solo zapatas superficiales. Cuando éste es el caso, es necesario el uso de fundaciones profundas las cuales se diseñan para transmitir estas cargas a estratos más profundos o para distribuirlas a lo largo de una mayor extensión de suelo. En el caso de cargas laterales, los pilotes son utilizados para resistir cargas de viento, terremotos, olas, impactos de barcos, estabilidad de taludes, etc. El análisis de pilotes cargados lateralmente es un problema de interacción suelo estructura, donde la cantidad de deflexión, momentos, cortantes y las reacciones generadas en el suelo dependen tanto de las propiedades del suelo como de las propiedades y dimensiones del pilote.

A través de los años se han utilizado diferentes métodos para analizar pilotes cargados lateralmente. Estudios como Broms (1964a, 1964b, 1965), Reese (1977), Poulos y Davis (1980), Ashour y Norris (2000) entre otros, establecieron guías y metodologías para analizar pilotes cargados lateralmente. Dada la complejidad del problema, la mayoría de las metodologías son aproximaciones que involucran distintas simplificaciones. De las distintas metodologías propuestas, la que ha tenido mayor acogida en la práctica geotécnica actual es el método de las curvas p-y. Esta metodología inicialmente fue propuesta por Matlock (1970) y Reese et al. (1974). El método se basa en reemplazar la reacción del suelo a lo largo y perímetro del pilote por resortes individuales no-lineales (resortes tipo Winkler). Las curvas p-y representan la reacción por unidad de longitud resultante del suelo alrededor del perímetro del pilote en función de la deflexión lateral del pilote a la profundidad la cual estas curvas p-y son computadas (profundidad del resorte). Estas curvas representan el comportamiento no lineal del suelo e idealmente se deben determinar mediante pruebas de carga a pilotes bien instrumentados. Debido

a los altos costos de determinar las curvas p-y de esta forma, generalmente en la práctica se utilizan curvas p-y empíricas que en la literatura se han propuesto para diferentes tipos de suelos (e.g., Reese et al. 1974, Matlock 1970, Welch y Reese 1972, y muchos otros). En general la mayoría formulaciones empíricas de curvas p-y sólo son función de las propiedades del suelo (e.g., parámetros de resistencia del suelo, nivel de esfuerzos, y ϵ_{50}) y el ancho del pilote. En otras palabras, las curvas p-y de la literatura no incluyen explícitamente otros factores potencialmente importantes tales como la forma de la sección transversal y la rigidez a la flexión del pilote.

El módulo de rigidez a la flexión del pilote es una propiedad del pilote que depende de la rigidez del material con el cual está compuesto el pilote y del momento de inercia de la sección transversal del mismo. La rigidez a la flexión del pilote influye grandemente en la forma deflectada del pilote y a su vez, ésta forma de deformación lateral del pilote influirá en las reacciones que se generarán por el suelo que rodea el pilote. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, esta propiedad del pilote no entra explícitamente en las formulaciones de las curvas p-y propuestas en la literatura especializadas en el tema. Esta tesis busca investigar analíticamente si la rigidez a la flexión del pilote es un factor que debe incorporarse en las formulaciones de las curvas p-y. Específicamente esta investigación estudia el caso de pilotes individuales instalados en medios arenosos.

1.2. Motivación

En la actualidad, los pilotes pueden tener una gran gama de secciones transversales y estar compuestos de diferentes tipos de materiales haciendo que el rango de valores de rigidez a la flexión sea bien amplio, desde pilotes bien flexibles ($EI \approx 1.2 \times 10^2 \text{ kN-m}^2$) a bien rígidos ($EI \approx 8.2 \times 10^5 \text{ kN-m}^2$). Sin embargo, las reacciones del suelo que predicen las curvas p-y de los resortes Winkler solo dependen del ancho del pilote. Estudios analíticos demuestran que el patrón de deformaciones del suelo depende en gran medida de la rigidez a la flexión del pilote.

La revisión de literatura presentada en el capítulo 2, nos muestra que no solo hay pocos estudios acerca de la influencia de la rigidez a la flexión sobre la reacción del suelo sino que éstos no presentan concordancia. Por ejemplo, autores como Fan y Long (2005), y Xiao y Wang (2007) determinaron que la rigidez a la flexión del pilote (EI) no es un parámetro sensible sobre las curvas p-y. Por otro lado, Ashour et al. (2002) concluyeron que el EI del pilote tiene una gran influencia en las reacciones del suelo, la forma de las curvas p-y, así como en la reacción última del suelo. La escasez de estudios en el tema así como la falta de consenso o acuerdo concerniente a la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre la reacción del suelo es la motivación principal para esta tesis.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis fue investigar la influencia de la rigidez a la flexión del pilote en las reacciones del suelo cuando éste es cargado lateralmente en una instalación en suelos arenosos. Otros objetivos secundarios de esta tesis incluyen:

- Evaluar analíticamente cómo influye la rigidez a la flexión del pilote (EI) sobre las curvas p-y para suelos arenosos.
- Examinar la capacidad de predicción del método de las curvas p-y y del método de la cuña de deformación en el caso de analizar pilotes no convencionales como los instalados en el caso histórico de Hampton, Virginia.

- Desarrollar una metodología analítica para obtener curvas p-y utilizando datos de deflexión lateral del pilote. Particularmente evaluar el caso cuando se utiliza inclinómetros en un pilote.

1.4. Organización

Esta tesis está compuesta por 7 capítulos. El capítulo 2 presenta la derivación de la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente. También se presenta una revisión de la literatura más relevante de los métodos más utilizados en la práctica para analizar pilotes bajo carga lateral. Estos métodos son el método de las curvas p-y y el método de la cuña de deformación. Del método de las curvas p-y se presentan los parámetros que intervienen en las formulaciones de las curvas p-y para arenas y algunas formas típicas de las curvas p-y de la literatura para diferentes tipos de suelos. Del método de la cuña de deformación se presentan los conceptos principales de cómo éste resuelve el problema de pilotes cargados lateralmente, y las formulaciones para la generación de sus propias curvas p-y.

En este capítulo también se presenta una revisión de literatura del módulo de subrasante y algunos estudios relacionados a la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre las curvas p-y.

El capítulo 3 contiene todo lo concerniente al estudio de casos hipotéticos para determinar la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y para suelos arenosos. Estos casos hipotéticos incluyen análisis de pilotes del mismo diámetro y sección transversal, pero diferentes EI. Se utilizan relaciones del momento-curvatura lineales y no lineales de pilotes embebidos en arenas sueltas, medianamente densas y densas. Se presentan curvas p-y de los pilotes para los diferentes EI a diferentes profundidades para los diferentes tipos de suelos determinadas utilizando un programa de computadora basando en el método de la cuña de deformación.

En el capítulo 4 se describe paso a paso la metodología para determinar curvas p-y desde datos de deflexión obtenida desde datos de inclinómetros. También se presenta una calibración

del método utilizando un programa de computadoras basado en la metodología de las curvas p-y, donde se determinan diagramas de momentos y curvas p-y de varios pilotes hipotéticos con relaciones de momento-curvatura lineales y no lineales utilizando solo los datos de deflexión obtenidos con el programa de computadora.

El capítulo 5 contiene los detalles acerca de los 3 pilotes de prueba del caso histórico de Hampton, Virginia. Se ofrecen detalles del perfil estratigráfico del sitio de prueba, de las propiedades de los materiales de los pilotes de prueba y del comportamiento o degradación del EI bajo los momentos aplicados. También se presentan diagramas de la ubicación de las cargas laterales y de algunas condiciones de instalación importantes propias de cada pilote al momento de efectuarse la prueba de carga. Por último se presentan los resultados obtenidos desde las pruebas de carga lateral de los 3 pilotes de prueba.

El capítulo 6 presenta los análisis de los 3 pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia utilizando dos programas comerciales, uno basado en la metodología de las curvas p-y (LPILE 5.0) y otro basado en la metodología de la curva de deformación (SWM 6.1). Se comparan los perfiles de deflexiones laterales a lo largo del pilote obtenidos con estos dos programas con los obtenidos en las pruebas de carga laterales. También se presentan las curvas p-y obtenidas utilizando ambos programas y la metodología propuesta en el capítulo 4 para los 3 pilotes de prueba a diferentes profundidades.

Finalmente el capítulo 7 presenta un resumen del trabajo realizado, las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

2. ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL PROBLEMA Y REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Introducción

Este capítulo describe la ecuación diferencial que gobierna el problema de un pilote cargado lateralmente y también presenta una revisión de literatura relacionada a los métodos más conocidos y utilizados en la práctica para resolver esta ecuación diferencial y analizar pilotes bajo carga lateral. El método más popular para analizar pilotes cargados lateralmente es el método de las curvas p-y no lineales. Un método menos popular y más reciente es el método de la cuña de deformación (Ashour et al. 1998a). Este segundo método, aunque no tan popular, ha empezado a utilizarse en varios departamentos de transportación de EEUU como WSDOT (*Washington State Department of Transportation*), NDOT (*Nevada Department of Transportation*) y ODOT (*Ohio Department of Transportation*). En este capítulo se describirán en detalle ambas metodologías y se presentará una revisión de la literatura sobre la reacción del suelo expresado en forma del módulo horizontal de subrasante. También se presenta una revisión de la literatura con énfasis en el tema central de esta tesis que es la influencia de la rigidez a la flexión del pilote (EI) en la reacción del suelo cuando el pilote es cargado lateralmente.

2.2. Ecuación diferencial que gobierna el problema de un pilote cargado lateralmente

Un pilote prismático instalado verticalmente está sujeto a presiones laterales ejercidas por el suelo que lo rodea. Cuando el pilote esta sin carga lateral, éste mantiene una alineación vertical y las presiones laterales del suelo son uniformes alrededor de la sección transversal. Esta condición se muestra en la Figura 2-1(a) donde se observa que la reacción resultante neta del

suelo $p(x)$, es cero al ser las presiones laterales uniformes alrededor de una sección transversal del pilote a una profundidad x . Esto es cierto para el caso de cero deflexión lateral ($y=0$). El pilote se deflectará al momento de ser aplicada una carga lateral, y las presiones que ejerce el suelo alrededor de una sección del pilote a una profundidad x dejarán de ser uniformes. En un lado del pilote, las presiones aumentan (parecido al caso de un muro bajo la condición de empuje lateral pasivo) y en el lado opuesto disminuyen tendiendo a una condición de empuje activo. Esto se muestra en forma esquemática en la Figura 2-1(b). En esta figura se observa que la sección a una profundidad x se ha deflectado una distancia horizontal “ y ” con respecto a su posición inicial (cuando el pilote no tenía carga lateral). Para esta condición deformada, la distribución de presiones alrededor de la sección del pilote es parecida a la que se muestra en la sección B-B’. La reacción neta del suelo será $p(x)$ y será un valor mayor que cero. Esta resultante “ $p(x)$ ” dependerá del nivel de deformación lateral del pilote “ y ” y como veremos más adelante también depende de la forma deflectada del pilote. En esta discusión la reacción del suelo $p(x)$ es una fuerza lineal distribuida a lo largo de la longitud del pilote. A una profundidad dada x , esta reacción se suele representar en forma de una curva que relaciona $p(x)$ con la deflexión lateral y (Figura 2-2).

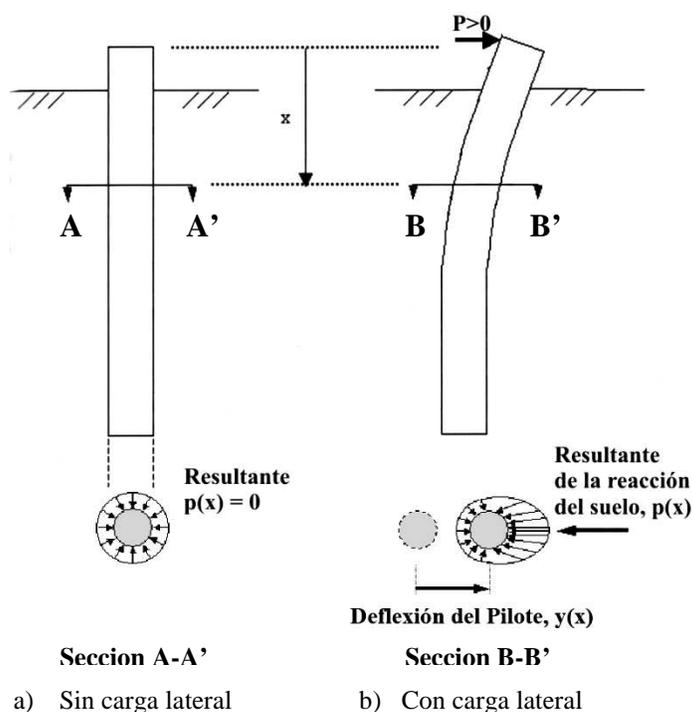


Figura 2-1. Distribución de los esfuerzos alrededor del pilote (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).

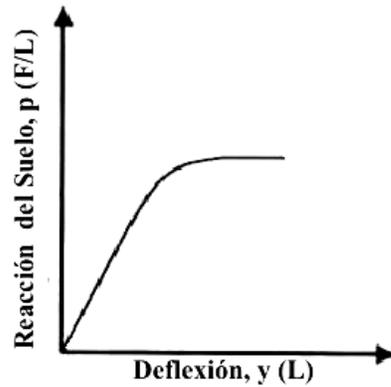


Figura 2-2. Forma típica de una curva p-y.

Para obtener la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente se puede estudiar como el de una viga-columna equivalente con una reacción del suelo representada como una fuerza lineal distribuida $p(x)$. Para obtener la ecuación diferencial es conveniente utilizar teoría de vigas como por ejemplo la de Bernoulli-Euler. La ecuación diferencial puede ser obtenida si analizamos un elemento infinitesimal del pilote de espesor (dx) y aplicando equilibrio de momentos como se muestra en la Figura 2-3.

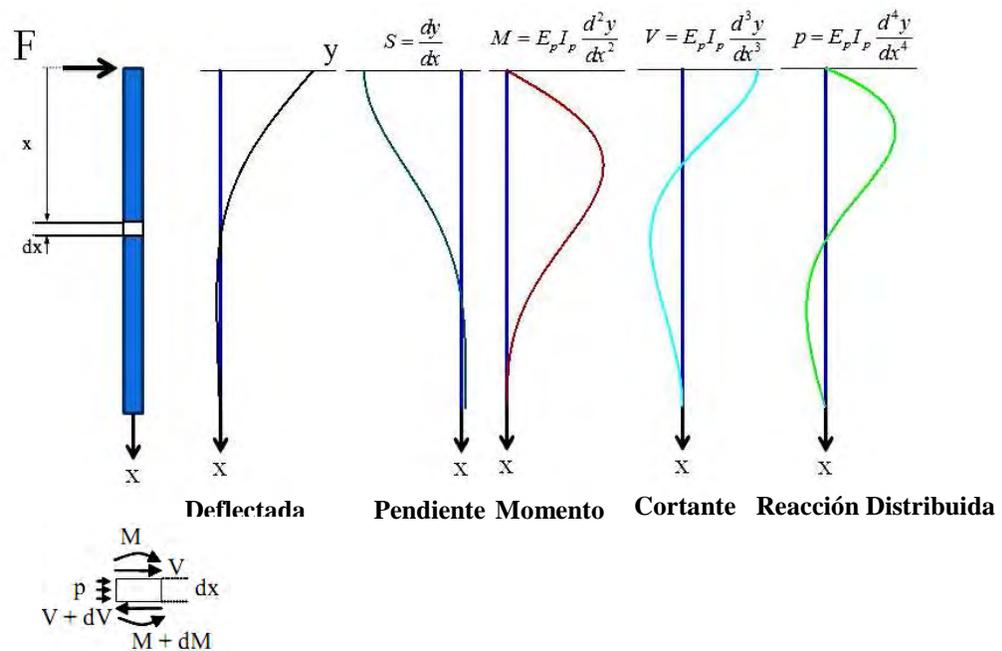


Figura 2-3. Solución típica del problema de pilotes cargados lateralmente

La sumatoria de momentos del elemento diferencial nos da:

$$\sum M = (M + dM) - M - Vdx + Qdy - (pdx) \frac{dx}{2} = 0 \quad (0.1)$$

Despreciando los términos cuadráticos y diferenciando dos veces con respecto a x, se obtiene:

$$\frac{d^2M}{dx^2} + Q \frac{d^2y}{dx^2} - \frac{dV}{dx} = 0 \quad (0.2)$$

El término correspondiente a carga axial (Q), normalmente suele ser ignorado para pilotes bajo carga lateral ya que la única carga axial proviene del peso propio del pilote y este peso puede ser considerado despreciable. La magnitud del momento que actúa sobre el elemento infinitesimal del pilote puede ser calculada al integrar los esfuerzos normales, $\sigma(z)$ que actúan sobre la sección transversal de área A, de la siguiente forma:

$$M = \int_A \sigma(z) z \, dA \quad (0.3)$$

En la teoría de Bernoulli-Euler se suele asumir que las secciones planas permanecen planas después de aplicada la carga, y sabiendo la rotación, $S = dy/dx$ y la ubicación del eje neutro para determinada rotación, se puede calcular la deformación que ocurre a través de la sección transversal del pilote. Para cierta rotación, S, se puede obtener lo siguiente:

$$\begin{aligned} u(x,y) &= Sz = \frac{dy}{dx} z \\ \varepsilon(z) &= \frac{du}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} z = k z \\ \sigma(z) &= E_p \varepsilon(z) = E_p k z \end{aligned} \quad (0.4)$$

donde:

$u(x,y)$ = desplazamiento en la dirección-x a través de la sección transversal del pilote;
 $\varepsilon(z)$ = deformación en la dirección-x a través de la sección transversal del pilote; y

z = distancia hasta el eje neutro.

Substituyendo la ecuación de $\sigma(z)$ de la Ecuación 2.4 en la Ecuación 2.3, se obtiene:

$$M = \int_A E_p k z^2 dA \quad (0.5)$$

Si el material del pilote se comporta en el rango lineal elástico con un módulo de elasticidad constante, E_p , se obtiene:

$$M = E_p k \int_A z^2 dA = E_p I_p k = E_p I_p \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (0.6)$$

Substituyendo la ecuación 2.6 en la ecuación 2.2 y despreciando el término correspondiente a carga axial, Q , se obtiene:

$$E_p I_p \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dV}{dx} = 0 \quad (0.7)$$

Considerando equilibrio de fuerzas horizontales del elemento infinitesimal del pilote mostrado en la Figura 2-3, se obtiene:

$$\sum F_x = p(x) dx - dV = 0$$

ó

$$p(x) = \frac{dV}{dx} \quad (0.8)$$

Substituyendo la Ecuación 2.8 en la Ecuación 2.7, obtenemos la siguiente ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} - p(x) = 0 \quad (0.9)$$

donde:

$E_p I_p$ = rigidez a la flexión del pilote;

x = profundidad medida desde la cabeza del pilote;

$p(x)$ = reacción resultante del suelo expresado como fuerza por unidad de longitud; y

y = deflexión lateral del pilote como función de la profundidad x .

Para resolver la ecuación diferencial anterior (Ec. 2.9) se suelen utilizar métodos numéricos basados en discretizar el pilote en una serie de elementos y modelar la reacción del suelo utilizando curvas p-y no lineales. La siguiente sección describe la solución de esta ecuación usando la metodología de las curvas p-y.

2.3. Solución mediante discretización del pilote y curvas p-y

Para resolver el problema de pilotes cargados lateralmente se debe determinar una solución a la ecuación diferencial mostrada en la sección anterior (Ec. 2.9). Una solución a esta ecuación diferencial se puede determinar utilizando métodos numéricos tal como el método de diferencias finitas. La solución de la ecuación diferencial por el método de diferencias finitas es un proceso iterativo donde el pilote es discretizado en elementos unidireccionales donde en cada nodo del pilote discretizado se utiliza un resorte no lineal para representar la reacción del suelo.

La Figura 2-4 muestra en forma esquemática el tipo de discretización utilizado así como la forma típica de la relación constitutiva de los resortes que representan la reacción del suelo.

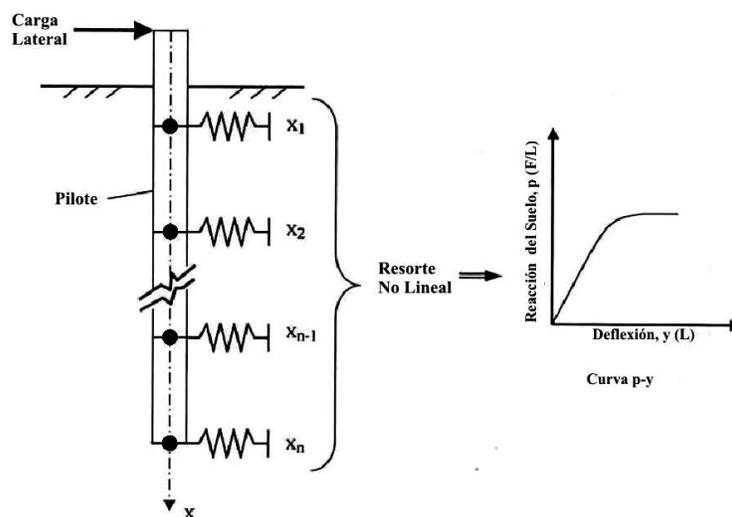


Figura 2-4. Esquemático del modelado del suelo en el método de las curvas p-y (adaptado de Pando 2003).

Programas comerciales como LPILE (Reese 1987) y su precursor COM624 (Reese 1977) usan esta discretización y la técnica de diferencias finitas para resolver la ecuación diferencial. Para esto se deben incorporar las condiciones de borde y definir las curvas p-y en cada nodo del pilote. Para llegar a una solución es necesario un proceso iterativo donde se refleje igualdad entre la respuesta no lineal del suelo (curvas p-y) y la deflexión lateral determinada por el método de diferencias finitas. Una descripción detallada del procedimiento numérico requerido para resolver el problema con este método se puede encontrar en Reese y Van Impe (2001). Para propósitos de esta tesis lo que nos interesa es la forma que se generan las reacciones en el suelo (p), que en este método siguen las curvas “p-y”. Estas se describen en la siguiente sección.

2.3.1. Descripción general curvas p-y

En la Figura 2-1 se ilustró cómo la resultante de las reacciones del suelo que actúan sobre un largo unitario del pilote es una fuerza por unidad de longitud del pilote $p(x)$. La teoría de viga relaciona $p(x)$ con la forma deflectada del pilote, $y = f(x)$, de la siguiente forma:

$$p(x) = E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} \quad (0.10)$$

Es decir la reacción $p(x)$ según teoría de vigas depende no solo de la deflexión lateral $y(x)$ a esa profundidad, sino más precisamente de la cuarta derivada de la curva $y = f(x)$. Sin embargo, la práctica geotécnica actual simplemente relaciona $p(x)$ con el nivel de deflexión lateral $y(x)$. Esta relación simplificada es lo que comúnmente se denomina la curva p-y. La Figura 2-5 muestra esquemáticamente una curva p-y y los elementos principales de la misma.

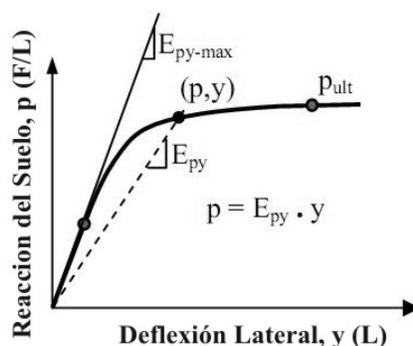


Figura 2-5. Curva p-y esquemática (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).

Normalmente las curvas p-y varían con la profundidad y con las características del suelo. Al ser la reacción $p(x)$ la resultante de las reacciones actuantes a lo largo de todo el perímetro del pilote, en la literatura las curvas p-y se suelen expresar como función del ancho o diámetro D del pilote.

Existen muchas referencias que proponen distintos tipos de curvas p-y para distintos tipos de suelos y condiciones de carga (estática, cíclica, etc.). La Tabla 2-1 presenta un resumen de algunas curvas p-y que comúnmente son utilizadas en la práctica de ingeniería geotécnica

Tabla 2-1. Curvas p-y empíricas comúnmente utilizadas para distintos suelos o rocas.

Tipo de Suelo	Referencia
Arcillas	McClelland y Focht (1958)
Arcilla suave por debajo del N.F.	Matlock (1970)
Arcilla rígida por debajo de N.F.	Reese et al. (1975)
Arcilla rígida por encima del N.F.	Welch y Reese (1972), Reese y Welch (1975)
Arenas	Reese, Cox y Koop (1974)
Arenas	Bhushan et al. (1981)
Arenas	O'Neill y Murchison (1983)
Arenas cementadas	Ismael (1990)
Suelos con cohesión y fricción	Evans y Duncan (1982)
Suelos con cohesión y fricción	Reese y Van Impe (2001)
Roca débil	Reese (1997)
Roca fuerte	Nyman (1982)

Nota: N.F. = Nivel freático.

Aunque la formulación de cada una de estas curvas p-y es distinta, todas tienen en común que depende de las propiedades del suelo (peso específico efectivo (γ'), ángulo de fricción interna efectivo (ϕ'), cohesión (c), resistencia al corte no drenada (S_u)), el ancho del pilote, y la profundidad a la que se desea determinar la curvas p-y. Ninguna de las curvas p-y recomendadas en la literatura toman en cuenta el nivel de esfuerzos generados, el método de instalación ni las propiedades del pilote tales como la forma de la sección transversal o la rigidez a la flexión del pilote. La Figura 2-6 muestra algunas curvas p-y que se encuentran en la literatura de acuerdo al tipo de suelo. Cada una de esas curvas p-y fueron determinadas a la misma profundidad, y utilizando la misma sección transversal y ancho del pilote. Se puede notar que hay una gran similitud entre las curvas p-y en arenas y las curvas p-y para suelos con cohesión y fricción, esto es porque los suelos con cohesión y fricción se suelen comportar más como suelos granulares que como suelos cohesivos (Reese y Van Impe 2001).

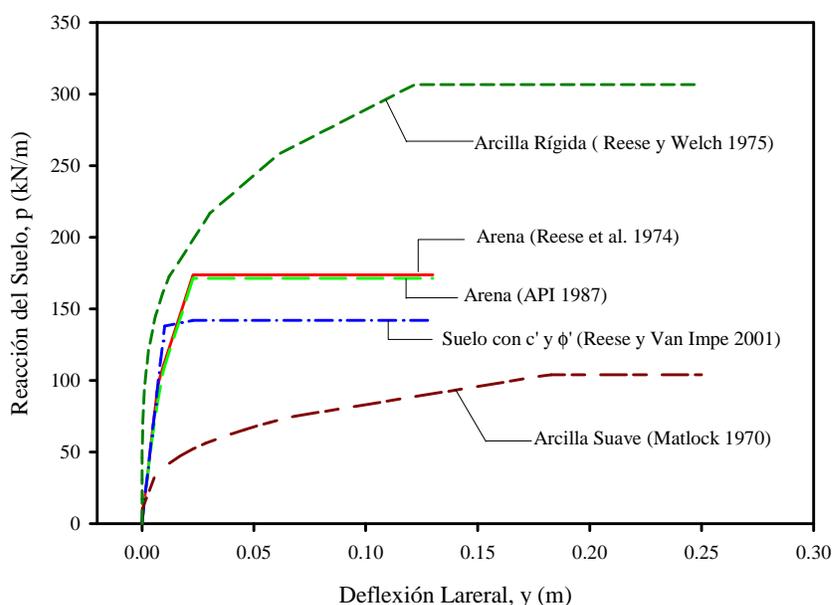


Figura 2-6. Curvas p-y de la literatura de acuerdo al tipo de suelo.

La influencia de la sección transversal del pilote o su rigidez a la flexión (EI) sólo aparecen en la variable de ancho (B o D) del pilote. La Figura 2-7 muestra 3 curvas p-y para arenas a una misma profundidad para pilotes de ancho B , $2B$ y $5B$. Se observa entonces un aumento de las reacciones del suelo $p(x)$, que es directamente proporcional al ancho B . También

se aprecia un cambio en la forma de las curvas p-y. Este cambio en la forma de las curvas es generada por el aumento en la deflexión lateral necesaria para que se genere el estado último de las reacciones del suelo.

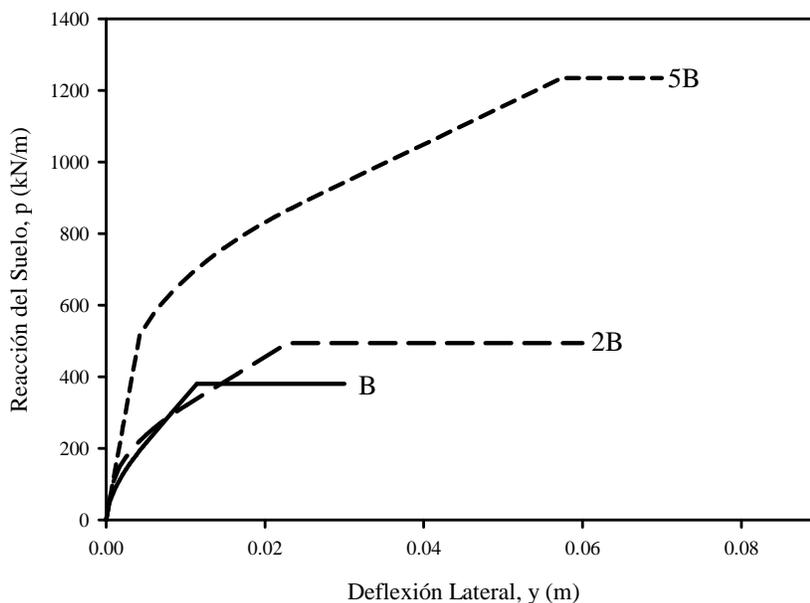


Figura 2-7. Curvas p-y para pilotes de diferentes diámetros determinadas a la misma profundidad.

Para poder ilustrar mejor las variables que influyen en la formulación de las curvas p-y en arenas, en la próxima sección se presentará detalladamente los conceptos generales de algunas curvas p-y para el caso de las arenas que es el enfoque principal de esta tesis.

2.3.2. Curvas p-y para arenas según Reese et al. (1974)

Reese et al. (1974) propusieron unas curvas p-y para analizar pilotes bajo carga lateral cuando éstos están instalados en suelos arenosos. Las curvas p-y propuestas se derivaron de pruebas de campo llevadas a cabo en pilotes tubulares de acero con un diámetro de 0.610 m. Estos pilotes fueron instrumentados en detalle para permitir medir la variación de la curvatura con la profundidad. Las pruebas de carga se realizaron en la isla Mustang, Texas. La forma típica de la curva derivada por estos autores tanto para cargas estáticas como para cargas cíclicas se muestra en la Figura 2-8. Se puede observar en esta figura que la curva tiene primero un tramo

lineal con pendiente k_y o $E_{py \text{ max}}$. Esta pendiente suele denominarse por algunos autores como el módulo horizontal de subrasante. Luego la curva tiene una relación no lineal hasta una deflexión lateral de $D/60$, donde D es el ancho del pilote. Para niveles de deflexión entre $D/60$ y $3D/80$, la curva p - y vuelve a ser lineal. La reacción del suelo llega a su valor último (P_{ult} o P_u) a una deflexión de $3D/80$ y de ahí en adelante se asume que la curva p - y no aumenta y se mantiene constante a un valor p_{ult} .

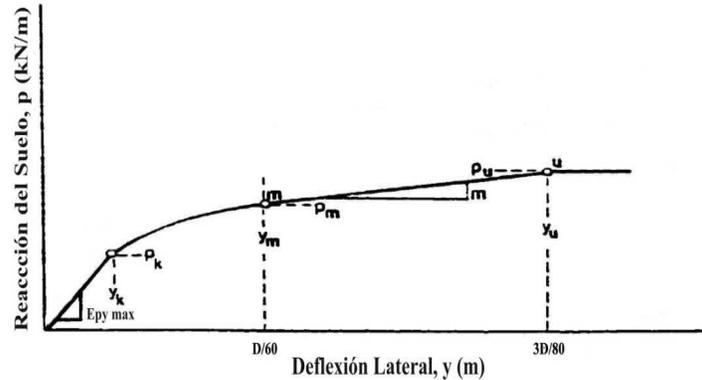


Figura 2-8. Forma característica de una curva p - y para arenas por encima y por debajo del nivel freático (adaptado de Reese et al. 1974).

Los pasos para generar las curva p - y para arena por encima y por debajo del nivel freático para cargas estáticas según propuesto por Reese et al. (1974) son:

1. Realizar los siguientes cálculos preliminares:

$$\alpha = \frac{\phi'}{2}; \quad \beta = 45 + \frac{\phi'}{2}; \quad K_0 = 0.4; \quad K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (0.11)$$

donde ϕ' es el ángulo de fricción interna de la arena.

2. Calcular la resistencia última del suelo por unidad de longitud del pilote tomado como el menor entre p_{st} y p_{sd} :

$$P_{st} = \gamma' z \left[\frac{K_0 z \tan \phi' \sin \beta}{\tan(\beta - \phi') \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi')} (D + z \tan \beta \tan \alpha) + K_0 z \tan \beta (\tan \phi' \sin \beta - \tan \alpha) - K_a D \right] \quad \text{Displ}$$

$$p_{sd} = K_a D \gamma z (\tan^2 \beta - 1) + K_0 D \gamma z \tan \phi' \tan^2 \beta \quad (0.13)$$

donde:

γ' = Peso específico efectivo del suelo a una profundidad x ;

D = ancho o diámetro del pilote; y

z = profundidad por debajo del nivel de la superficie del terreno donde se desea determinar la reacción del suelo.

3. Calcular la resistencia última del suelo por unidad de longitud del pilote tomando en cuenta el tipo de carga con:

$$p_{ult} = \bar{A}_s p_s \quad (0.14)$$

donde \bar{A}_s = coeficientes que toman en cuenta el tipo de carga (Figura 2-9).

4. Establecer el punto máximo p_m de la parte parabólica:

$$p_m = B_s p_s \quad (0.15)$$

donde B_s es una constante que se puede calcular utilizando la Figura 2-10.

5. Establecer la parte lineal inicial de la curva p - y :

$$p = (k_{py} z) y \quad (0.16)$$

6. Establecer la porción parabólica de la curva que se encuentra entre los puntos m y u con:

$$p = \bar{C} y^{\frac{1}{n}}; m = \frac{p_{ult} - p_m}{y_u - y_m}; n = \frac{p_m}{m y_m}; \bar{C} = \frac{p_m}{y_m^{\frac{1}{n}}}; y_k = \left(\frac{C}{kz} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (0.17)$$

donde k = constante empírica que depende de la densidad relativa de la arena (ver Tabla 2.2).

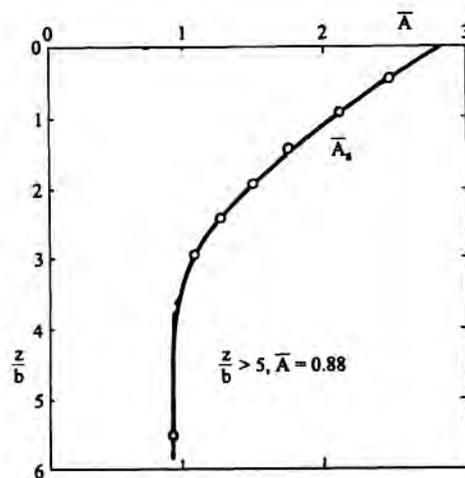


Figura 2-9. Valores del coeficiente \bar{A} para carga estática (adaptado de Reese et al. 1974).

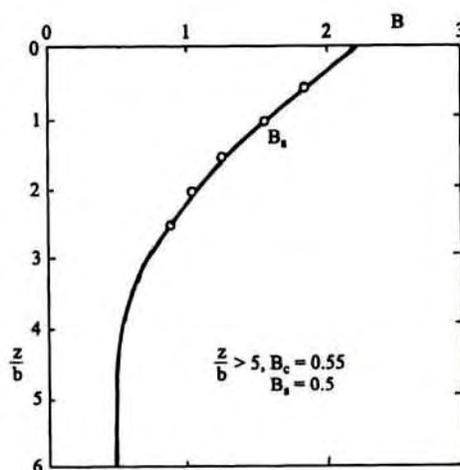


Figura 2-10. Valores de la constante B para carga estática (adaptado de Reese et al. 1974).

Tabla 2.2. Valores de k_{py} para arenas según Reese y Van Impe (2001).

Densidad de la arena	Arena Sumergida (lb/in ³)	Arena por Encima del N.F. (lb/in ³)
Suelta	20	25
Mediana	80	90
Densa	125	225

Nota: N.F = Nivel Freático

La Figura 2-11 muestra las curvas p - y obtenidas según este método para tres profundidades a lo largo de un pilote instalado en una arena densa ($k_{py} = 61 \text{ MN/m}^3$)

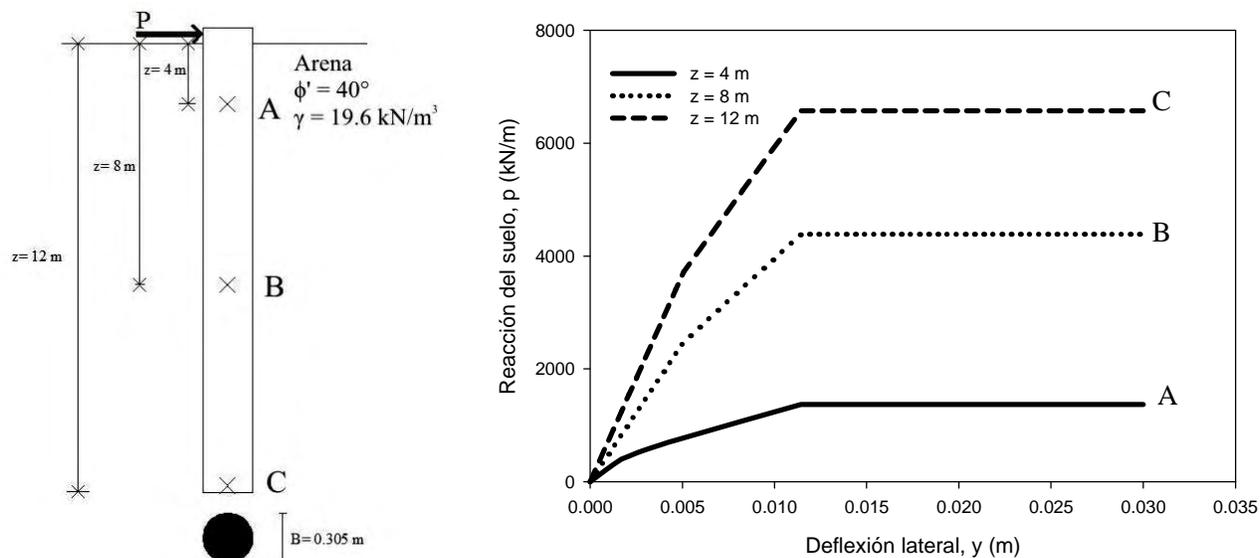


Figura 2-11. Curvas p-y de Reese et al. (1974) a diferentes profundidades.

De la Figura 2-11 se puede apreciar que, a medida que aumenta la profundidad, los valores de P_{ult} y la pendiente inicial de la curva p-y (E_{py_max}) también aumentan. El valor de la pendiente inicial aumenta porque se asume que la rigidez del suelo aumenta con la profundidad. Este comportamiento es típico de suelos granulares, por lo cual se puede utilizar la aproximación del valor de $E_{py_max} = k_{py} z$. El valor de deflexión requerido para llegar a P_{ult} es el mismo para cada una de las curvas ($3D/80$); esto es porque D es el mismo en todas las profundidades.

Estas curvas p-y propuestas por Reese et al. (1974) no dependen de la rigidez a la flexión del pilote. Es decir, si el pilote de la Figura 2-11 fuese de un material blando y dúctil como el plástico, las curvas p-y mostradas en dicha figura serían las mismas; esto se cumple siempre y cuando el ancho del pilote sea el mismo. Por ejemplo, las curvas p-y de la Figura 2-11 aplicarían para cualesquiera de los pilotes que se muestran en la Figura 2-12. Se puede observar que estos pilotes tienen el mismo ancho $B = 0.305$ m pero las rigideces a la flexión varían de 8.2×10^5 a 1.2×10^2 kN-m² y además algunas son lineales y otras claramente no lineales. A pesar de esta gran variabilidad en EI , todas las curvas p-y son las mismas para todos los pilotes.

a) Pilote de Acero y Sección Sólida



$$I_p = 0.0004 \text{ m}^2$$

$$E_p = 200 \text{ GPa}$$

$$E_p I_p = 8.5E4 \text{ kN-m}^2 \quad (\text{constante})$$

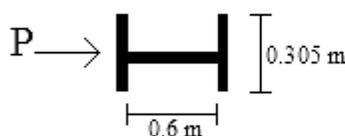
b) Pilote Tubular de Acero con $t = 0.05 \text{ m}$ 

$$I_p = 0.00034 \text{ m}^2$$

$$E_p = 200 \text{ GPa}$$

$$E_p I_p = 6.8E4 \text{ kN-m}^2 \quad (\text{constante})$$

c) Pilote H de Acero

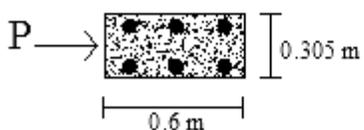


$$I_p = 0.004 \text{ m}^2$$

$$E_p = 200 \text{ GPa}$$

$$E_p I_p = 8.2E5 \text{ kN-m}^2 \quad (\text{constante})$$

d) Pilote Hormigón Pretensado



$$I_p = 0.0055 \text{ m}^2$$

$$E_p = 26.5 \text{ GPa}$$

$$E_p I_p = 1.5E5 \text{ kN-m}^2 \quad (\text{no lineal})$$

e) Pilote de Plástico Reforzado



$$I_p = 0.00034 \text{ m}^2$$

$$E_p = 275 \text{ MPa}$$

$$E_p I_p = 1.2E2 \text{ kN-m}^2 \quad (\text{no Lineal})$$

Figura 2-12. Posibles secciones transversales de pilotes de diversos EI donde aplicar curvas p-y Fig. 2-11.

2.3.3. Curvas p-y para arenas según las recomendaciones de API (1987)

El procedimiento para determinar las curvas p-y para arenas recomendado por Reese et al. (1974) es algo tedioso de implementar. En vista de esto, O'Neill y Murchison (1983) implementaron un método algo más simplificado para estimar las curvas p-y para suelos arenosos. Estas curvas p-y modificadas se calibraron con datos experimentales y fueron aceptadas por el comité de API. Las diferencias principales entre las curvas p-y de API (1987) y las determinadas por Reese et al. (1974) son: la implementación de tres coeficientes C_1 , C_2 y C_3 , utilizados para calcular la resistencia última del suelo en función del ángulo de fricción interna del suelo (Figura 2-13); la pendiente inicial de las curvas p-y relacionada al coeficiente de subrasante, se propone de forma grafica como se presenta en la Figura 2-14; el factor de ajuste experimental A para el caso de carga estática se presenta en forma de una ecuación lineal. A continuación se presenta el procedimiento simplificado propuesto por API (1987) para determinar las curvas p-y en arenas para cargas estáticas:

1. Calcular la resistencia última del suelo por unidad de longitud del pilote tomando el menor de:

$$p_{ult} = (C_1 z + C_2 D) \gamma' z \quad (0.18)$$

$$p_{ult} = C_3 D \gamma' z \quad (0.19)$$

2. Calcular coeficiente de ajustes A con:

$$A = \left(3.0 - 0.8 \frac{z}{D} \right) \geq 0.9 \text{ (carga estática)} \quad (0.20)$$

3. Determinar la forma característica de la curva con:

$$p = A p_{ult} \tanh\left(\frac{kz}{A p_{ult}} y\right) \quad (0.21)$$

donde:

C_1 , C_2 y C_3 = coeficientes (Figura 2-10);

k = coeficiente de subrasante (Figura 2-11);

D = diámetro del pilote;
z = profundidad a la que se desea obtener la curva p-y; y
 γ' = peso unitario efectivo del suelo.

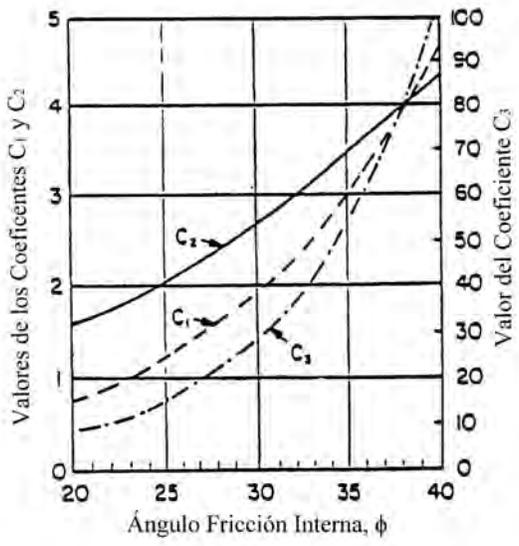


Figura 2-13. Coeficientes en función del ángulo de fricción interna del suelo (adaptado de API 1987).

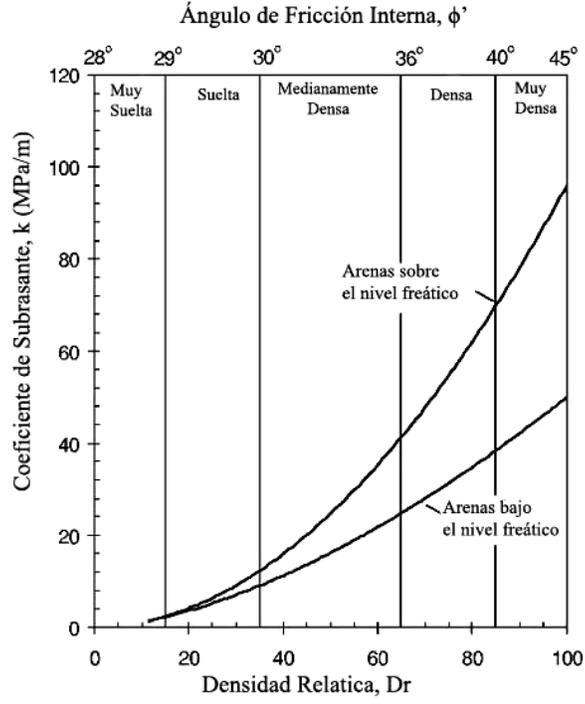


Figura 2-14. Coeficiente horizontal de subrasante en función de la densidad relativa y el ángulo de fricción interna del suelo (adaptado de API 1987).

La Figura 2-15 muestra una comparación entre las curvas p-y de Reese et al. (1974) y las de API (1987). Las curvas p-y de API evidencian una reducción en la reacción última del suelo (p_u). También esta curva p-y presenta generar mayores reacciones del suelo a menor cantidad de deflexión lateral. Los puntos que comparten en común estas dos curvas son la pendiente inicial (módulo de subrasante) y la cantidad de deflexión lateral necesaria para generar la reacción última del suelo.

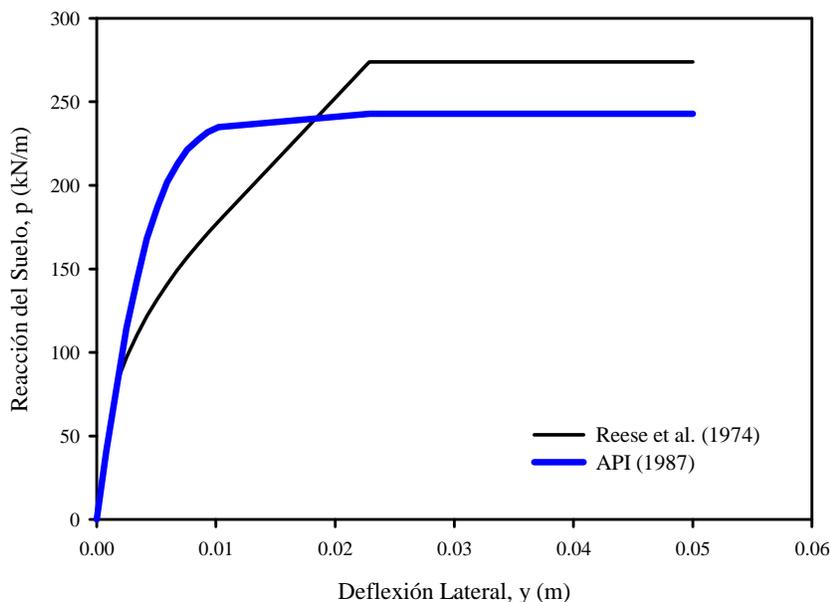


Figura 2-15. Comparación entre las curvas p-y de Reese y de API a la misma profundidad.

2.4. Método de la cuña de deformación (MCD)

Un método alternativo para resolver el problema de pilotes bajo carga lateral es el método de la cuña de deformación o (*Strain Wedge Method*, en inglés) el cual fue desarrollado por Norris y colaboradores (e. g., Abdollaholiae 1985, Norris 1986, y Ashour 1996). El concepto básico de este método es asumir que el suelo cercano a la superficie del terreno controla la solución del problema y que eventualmente se forma una cuña pasiva detrás del pilote y al acercarse éste a su estado de carga lateral última o falla. El mecanismo de falla y la cuña que se genera se ilustra en la Figura 2-16.

Este método se basa en usar cálculos de los esfuerzos, deformaciones y la resistencia de la cuña pasiva en tres dimensiones que se genera detrás del pilote al cargarse lateralmente, para aplicarlos a la solución de una viga equivalente en una fundación elástica (VFE) en una dimensión. El objetivo principal del método de la cuña de deformación (abreviado MCD) es evaluar el módulo de subrasante (módulo secante de la curva p-y) necesario para resolver el problema de una VFE para pilotes bajo carga lateral (Ashour et al. 2004). Al obtener los parámetros apropiados por el MCD, se puede resolver la ecuación diferencial de cuarto grado que gobierna el problema de pilotes bajo carga lateral la cual fue discutida anteriormente (Ecuación 2.9).

El método de la cuña de deformación ha sido utilizado validado por sus autores mediante análisis de varios casos históricos relacionados a pilotes bien instrumentados sometidos a pruebas de cargas laterales a escala real. Algunos de estos casos históricos utilizados para la validación se presentan en la Tabla 2-3.

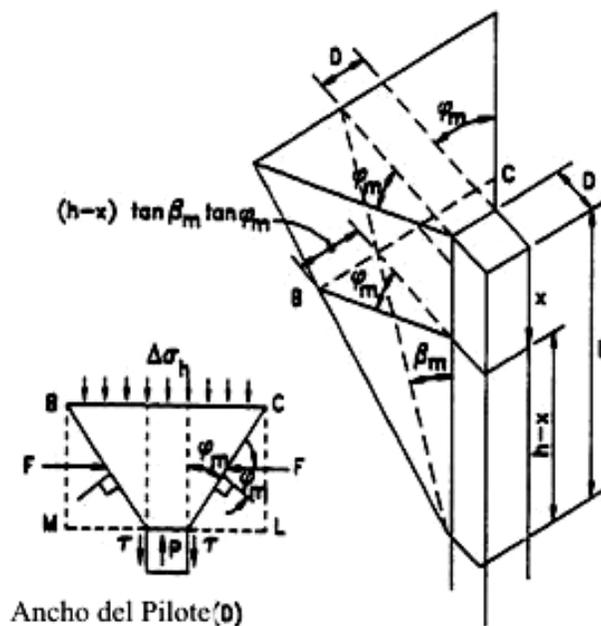


Figura 2-16. Configuración básica de la cuña pasiva para un suelo uniforme (adaptado de Ashour et al. 1998a).

Tabla 2-3. Casos históricos analizados con el MCD (adaptado de Ashour et al. 1998a).

Caso Histórico	Descripción
Isla Mustang, Texas (1974)	Prueba de carga lateral a escala real a un pilote en arena sumergida.
Lago Austin y Río Sabine, Texas (1970)	Pruebas de cargas laterales a escala real a un pilote en arcilla suave.
Proyecto del Río Arkansas, Arkansas (1963)	Pruebas de cargas laterales a escala real a diferentes tipos de pilotes en arena medianamente densa.
Universidad de Houston, Texas (1986)	Prueba de carga lateral a escala real a un pilote en arcilla.
Universidad de Texas, Austin (1975)	Prueba de carga lateral a escala real a un fuste de hormigón reforzado en arcilla rígida.
Gill, San Francisco, California (1969)	Pruebas de cargas laterales a escala real a pilotes tubulares de acero en un perfil de suelo arenoso estratificado.
Edificio Pyramid en Memphis, Tennessee (1992)	Prueba de carga lateral a escala real a un pilote en un perfil de suelo arcilloso estratificado.

Las próximas subsecciones describen en mayor detalle el método de la cuña de deformación.

2.4.1. Configuración de la cuña pasiva para un perfil de suelo uniforme

El método MCD asume que cerca de la superficie del terreno la deflexión lateral del pilote varía en forma lineal con la profundidad. Esta suposición fue asumida por los autores Abdollaholiae (1985) y Norris (1986) para profundidades entre la superficie del suelo y el punto de rotación del pilote. Esta simplificación se muestra en la Figura 2-17 donde también se observa

la variación real de la deflexión. La idealización de deformación lineal define la profundidad “h” de la cuña pasiva que se genera detrás del pilote al deformarse y eventualmente llegar a la falla.

La cuña pasiva que se genera detrás del pilote, según este método es la presentada en la Figura 2.15. En esta figura la profundidad “h” representa la altura de la cuña. La forma de la cuña pasiva es caracterizada por los ángulos $\theta_m = 45 - \frac{\varphi_m}{2}$, $\beta_m = 45 + \frac{\varphi_m}{2}$ y el ángulo de fricción movilizada del suelo (φ_m). La dimensión “h” está directamente relacionada a la rigidez a la flexión del pilote, ya que esta se basa en la aproximación mostrada en la Figura 2-16. Como se muestra en esta figura “h” se basa en la representación lineal de la deflexión del pilote desde la superficie hasta el punto de rotación. La forma de la cuña también dependerá de propiedades del suelo (como ángulo de fricción interna del suelo (φ'), nivel de esfuerzos generados, etc.).

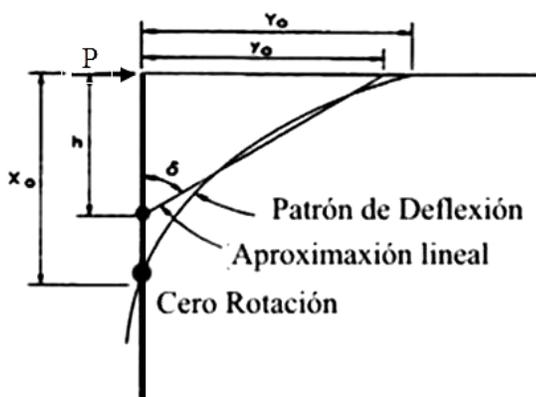


Figura 2-17. Deflexión lateral real comparada con idealización lineal para un pilote de cabeza libre cargado lateralmente (adaptado de Norris 1986).

Una ventaja del MCD es que no es necesario obtener reacciones del suelo a distintas profundidades, es decir, utilizar resortes con relaciones constitutivas como las curvas p-y. En la siguiente sección se describen en detalle los conceptos utilizados por el MCD para resolver el problema de pilotes bajo carga lateral.

2.4.2. Técnica de múltiples sub-estratos en el método de la cuña de deformación

Inicialmente el MCD fue propuesto para resolver el problema de pilotes cargados lateralmente en suelos uniformes. En los últimos años este método ha sido mejorado para resolver el problema de pilotes bajo carga lateral en suelos estratificados. Ashour et al. (1998a) implementaron modificaciones al MCD y generaron una técnica llamada, técnica de múltiples sub-estratos (*multi-sublayer technique*, en inglés). Esta aproximación consiste en dividir el suelo y el pilote en segmentos de espesor constante, cada sub-estrato de suelo se considera que se comporta como un estrato de suelo uniforme, y la interacción suelo-pilote de la parte deflectada se considera como una viga continua cargada con diferentes pequeños segmentos de carga uniforme sobre soportes elásticos no lineales representados por el módulo de subrasante, tal y como se muestra en la Figura 2-18.

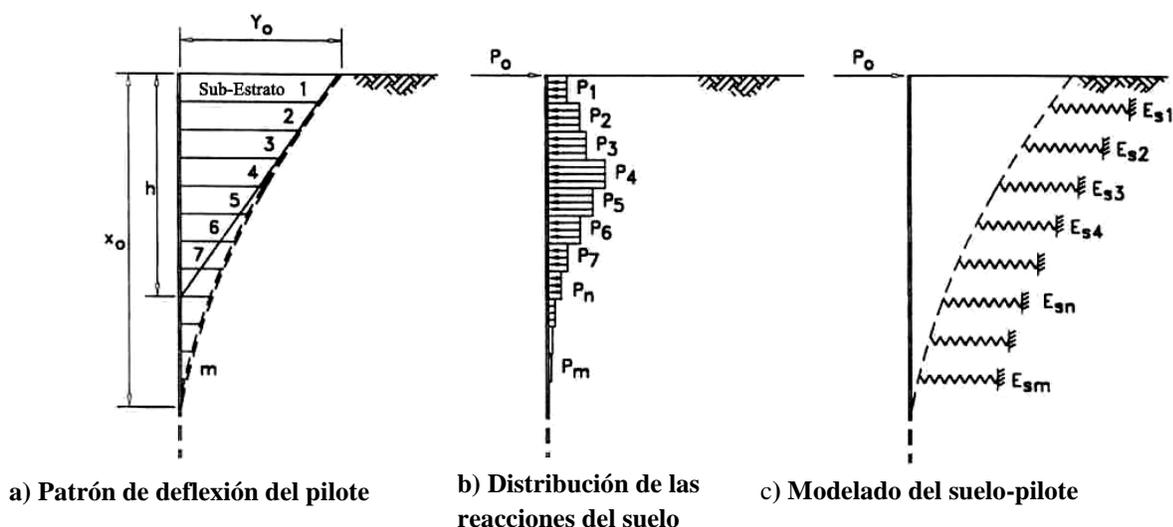


Figura 2-18. Distribución de las reacciones del suelo por unidad de longitud del pilote sobre la forma deflectada del pilote (adaptado de Ashour y Norris 2000).

Las ecuaciones utilizadas para obtener las dimensiones de la cuña pasiva deben ser aplicadas a cada sub-estrato “i”, Ashour recomienda que cada sub-estrato “i” debe ser igual a uno o dos pies de altura, las dimensiones de la cuña para cada sub-estrato pueden ser representadas por:

$$(\theta_m)_i = 45 - \frac{(\varphi_m)_i}{2} \quad (0.22)$$

$$(\beta_m)_i = 45 + \frac{(\varphi_m)_i}{2} \quad (0.23)$$

$$(\overline{BC})_i = D + (h - x_i) 2(\tan \beta_m)_i (\tan \varphi_m)_i \quad (0.24)$$

donde:

h = profundidad total de la cuña pasiva delante del pilote; y

x_i = profundidad medida desde la parte superior de la cuña pasiva hasta el centro de cada subcapa.

En términos generales, el problema de pilotes cargados lateralmente utilizando el MCD se resuelve de manera iterativa de la siguiente forma: [1] asumir una profundidad “ h ” de la cuña pasiva, para esta profundidad “ h ” se obtiene un perfil de la variación del módulo de subrasante con la profundidad (utilizando las Ecuaciones 2.26 – 2.31); [2] luego basado en este perfil de E_s se obtienen los valores de X_0 y Y_0 , definidos en la Figura 9, resolviendo el problema de VFE cuando esta está bajo una carga arbitraria P_0 ; [3] con los valores de X_0 y Y_0 se obtiene un nuevo valor de “ h ” el cual se compara con el asumido; [4] se continua repitiendo este procedimiento de forma iterativa hasta que “ h ” y Y_0 converjan.

2.4.3. Determinación del módulo de subrasante por el MCD

El módulo de subrasante, E_s , es el módulo que refleja la interacción suelo-pilote a cualquier profundidad durante la aplicación de la carga relacionada a la deformación del suelo-pilote y se puede representar por:

$$(E_s)_i = \frac{p_i}{y_i} \quad (0.25)$$

donde:

p_i = fuerza por unidad de longitud del pilote o la reacción del suelo en VFE;

y_i = deflexión del pilote a una profundidad específica; y

i = indica el numero del sub-estrato del suelo en cuestión.

En el MCD este módulo de subrasante está relacionado al módulo de Young del suelo, E, por dos parámetros de vínculo A y Ψ_s . El primer parámetro, A, está en función de las dimensiones del pilote, las dimensiones de la cuña pasiva, los esfuerzos aplicados y las propiedades del suelo, este primer parámetro se calcula por:

$$A_i = \frac{\overline{BC}S_1}{D} + \frac{2\tau_i S_2}{(\Delta\sigma_{hf})_i} = S_1 \left(1 + \frac{(h-x_i)2(\tan \beta_m \tan \varphi_m)_i}{D} \right) + \frac{2S_2(\overline{\sigma}_{vo})_i \tan(\varphi_m)_i}{(\overline{\sigma}_{vo})_i \left[\tan^2 \left(45 + \frac{(\varphi_m)_i}{2} \right) - 1 \right]} \text{ (arenas)} \quad (0.26)$$

$$A_i = S_1 \left(1 + \frac{(h-x_i)2(\tan \beta_m \tan \varphi_m)_i}{D} \right) + \frac{S_2(SL_t)_i}{SL_i} \text{ (arcillas)} \quad (0.27)$$

donde:

S_1 y S_2 son factores de forma, para pilotes circulares sus valores son 0.75 y 0.5 respectivamente y para un pilote cuadrado ambos factores son igual a 1 (Briaud et al. 1984);

D = diámetro del pilote;

$(\overline{\sigma}_{vo})_i$ = esfuerzo efectivo calculado hasta el centro del sub-estrato en cuestión;

φ_m = ángulo de fricción movilizado del suelo; y

SL_i, SL_t = nivel de esfuerzos y nivel de esfuerzos cortantes respectivamente (ver sección 2.4.4.).

El segundo parámetro Ψ_s , depende del módulo de Poisson (ν) y del ángulo de fricción movilizado del suelo (φ_m), éste relaciona la deformación del suelo con el ángulo resultante de la deflexión linealizada, δ , este segundo parámetro se puede expresa como:

$$\Psi_s = \frac{\varepsilon}{\delta} = \frac{2}{(1 + \nu) \sin 2\varphi_m} \quad (0.28)$$

La reacción del suelo, la deflexión del pilote y el módulo de subrasante a cierta profundidad se calcula por:

$$p_i = A_i D SL_i (\Delta\sigma_{hf})_i = A_i D E_i \varepsilon \quad (0.29)$$

$$y_i = \delta(h - x_i) = \frac{\varepsilon(1 + \nu) \sin 2\varphi_m (h - x_i)}{2} \quad (0.30)$$

$$(E_s)_i = \frac{p_i}{y_i} = \frac{A_i}{(h - x_i)} D \Psi_s E_i \quad (0.31)$$

Las ecuaciones mostradas en esta sección se utilizan para determinar la variación no lineal del módulo de subrasante con la profundidad hasta profundidades menores o iguales a la del punto de cero deflexión lateral o punto de pivote en el MCD.

2.4.4. Curvas p-y no lineales determinadas desde el MCD

El MCD es capaz de obtener sus propias curva p-y no lineales tomando en cuenta la continuidad del suelo, las propiedades del suelo y del pilote (rigidez a la flexión, forma y las condiciones de la cabeza del pilote) y el nivel de esfuerzos. Estas presentaron buena aproximación al ser comparadas con curvas p-y de la literatura obtenida desde datos experimentales (por ejemplo Matlock 1970). La Figura 2-19 muestra la forma característica de una curva p-y determinada con el MCD. Esta curva se divide en 3 fases principales, y una fase final de falla. Sin importar el tipo de suelo, las curvas p-y determinadas con el MCD empiezan con una pendiente inicial igual al módulo de subrasante asociado al módulo de esfuerzo-deformación del suelo a una deformación $\varepsilon = 10^{-4}$.

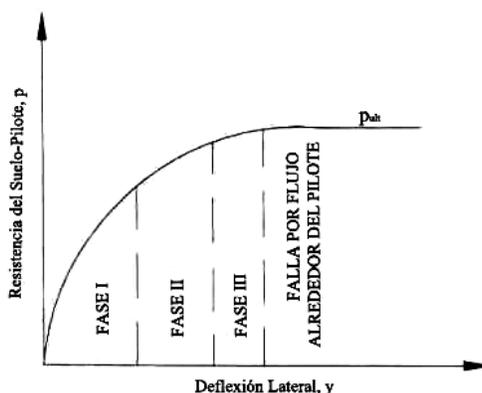


Figura 2-19. Curva p-y característica en el MCD (adaptado de Ashour y Norris 2000).

A continuación se describirá cada una de las fases necesarias para construir las curvas p-y utilizando los conceptos del MCD según Ashour et al. (1998a).

- Fase I:

Esta primera Fase comienza en el origen ($p = 0$, $y = 0$) a niveles bajos de deformación, la reacción del suelo por unidad de longitud del pilote (Ecuación 2.31) comienza a crecer acorde al nivel de esfuerzos ($SL_i < 1$ y $SL_t < 1$) los cuales se pueden calcular con:

$$SL_i = \frac{\Delta\sigma_h}{\Delta\sigma_{hf}} = \left(\frac{\tan^2(45 + \varphi_m) - 1}{\tan^2(45 + \varphi) - 1} \right)_i \quad (0.32)$$

$$(SL_t)_i = \left(\frac{2 \tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi)} \right)_i \quad (0.33)$$

donde:

λ y 3.707 = parámetros de ajuste de la curva hiperbólica, $\lambda = 3.19$;

ε_{50} = la deformación al 50% del nivel de esfuerzos;

SL = nivel de esfuerzos; y

SL_t = nivel de esfuerzos cortante.

- Fase II:

Esta segunda Fase comienza cuando el esfuerzo cortante que se genera a ambos lados del pilote llega a su valor último, éste se calcula con:

$$\tau_{ult} = (\bar{\sigma}_{vo})_i \tan(\varphi)_i \text{ (arenas)} \quad (0.34)$$

$$\tau_{ult} = S_u \text{ (arcillas)} \quad (0.35)$$

En esta Fase, la resistencia del suelo por unidad de longitud del pilote sigue creciendo pero ahora de forma mucho más lenta, esto porque el segundo termino de la Ecuación 2.28 ó 2.29 y el ángulo de fricción movilizados se fijan a valores últimos ($SL_i < 1$ y $SL_t = 1$).

- Fase III:

Esta Fase comienza cuando el nivel de esfuerzos en el sub-estrato de interés llega a la unidad ($SL_i = 1$), en otras palabras, cuando el ángulo de fricción movilizada del suelo alcanza el valor del ángulo de fricción interna del suelo. En ese momento, la resistencia del suelo por unidad de longitud del pilote alcanza su valor último. No obstante a eso, el valor de p_{ult} en arenas sigue creciendo porque, como vimos en la Ecuación 2.28 la resistencia del suelo depende de las

dimensiones de la cuña pasiva y como no todos los sub-estratos llegan al mismo tiempo a su valor último, la profundidad de la cuña “h” seguirá creciendo hasta que se genere una falla ya sea por flujo alrededor del pilote o por la generación de una bisagra plástica en el pilote (falla estructura del pilote).

La última sección de la curva p-y generada por el MCD comienza cuando ocurre flujo alrededor del pilote (criterio de falla). En arcillas, este criterio de falla no depende del tamaño de la cuña pasiva, y se puede generar inclusive cuando el nivel de esfuerzos aun no alcanza la unidad ($SL_i < 1$) pero el valor del parámetro A alcance un valor último por:

$$A_{ult} = 5S_1 + S_2 \quad (0.36)$$

$$(p_{ult})_i = 10(S_w)_i DS_1 + 2(S_w)_i DS_2 \quad (\text{cuando } SL_i = 1) \quad (0.37)$$

$$(p_{ult})_i = SL_i [10(S_w)_i DS_1 + 2(S_w)_i DS_2] \quad (\text{cuando } SL_i < 1, \text{ y } A_i = A_{ult}) \quad (0.38)$$

El valor de la resistencia última para suelos arcillosos se calcula utilizando una de las ecuaciones mostradas anteriormente (Ecuación 2.39 ó 2.40) al cumplirse la condición que suceda primero ($SL = 1$ ó $SL_i < 1$ pero $A_i = A_{ult}$). Los asunciones para desarrollar los criterios de falla para arcillas fueron inicialmente propuestos por Reese (1983) y posteriormente modificados para incluir el efecto del esfuerzo cortante en las caras del pilote y la forma del pilote por Gowda (1991).

En suelos arenosos, el valor de la reacción última del suelo por unidad de longitud del pilote si depende del tamaño de la cuña pasiva. Como se mencionó anteriormente en esta sección, la reacción última del suelo alcanzará un valor ultimo cuando $SL_i = 1$ y $SL_t = 1$, pero seguirá creciendo hasta que genere una falla ya sea por flujo alrededor del pilote o por la generación de una bisagra plástica (falla estructura del pilote). En suelos arenosos, la falla por flujo alrededor del pilote se generará cuando $SL_i = 1$ y el valor del parámetro A_i alcance un valor último A_{ult} . Este concepto de A_{ult} fue propuesto inicialmente por Reese (1983) y modificado por Ashour et al. (1998a) y se puede calcular por:

$$A_{ult} = \frac{(K_a)_i \left[(K_p)_i^4 - 1 \right] + (K_0)_i (K_p)_i^2 \tan \varphi_i}{(K_p)_i - 1} \quad (0.39)$$

donde:

K_0 = coeficiente de empuje de tierra en reposo;
 K_a = coeficiente de empuje de tierra activo de Rankine; y
 K_p = coeficiente de empuje de tierra pasivo de Rankine.

Por último, si se genera una falla por la generación de una bisagra plástica en el pilote (falla estructural) cuando $SL_i \leq 1$, la profundidad “h” de la cuña pasiva se establecerá como un valor fijo, y el ancho de la cuña (BC_i) y la resistencia del suelo serán limitados ya sea cuando $SL = 1$ o cuando $A = A_{ult}$.

2.5. Módulo de subrasante en pilotes bajo carga lateral

Como hemos descrito anteriormente en este capítulo, cuando cargamos pilotes lateralmente se genera una presión de contacto entre el pilote y el suelo. El módulo de horizontal subrasante es la representación de esta presión que se genera entre el pilote y el suelo, esta es análoga a la presión que se genera debajo de una fundación superficial. Terzaghi (1955) establece que este módulo horizontal de subrasante $E_{py} = p/y$ generalmente se asume constante con la profundidad para suelos cuya rigidez no aumente significativamente con la profundidad, como lo son las arcillas rígidas. Para suelos cuya rigidez aumente con la profundidad como lo son las arenas o las arcillas normalmente consolidadas, este módulo horizontal de subrasante es independiente del diámetro del pilote y puede asumirse que aumenta de forma lineal con la profundidad.

La Tabla 2-4 presenta los valores recomendados por Terzagui para el coeficiente de subrasante (k) para arenas en término de la densidad relativa.

Tabla 2-4. Recomendaciones de Terzaghi para el valor de k en arenas (adaptado de Reese y Van Impe, 2001).

Densidad relativa	Suelta	Mediana	Densa
Por encima del N.F., k (MN/m ³)	0.95-2.8	3.5-10.9	13.8-27.7
Por debajo del N.F., k (MN/m ³)	0.57-1.7	2.2-7.3	8.7-17.9

Un sin número de autores han propuesto diferentes formas de estimar este módulo, ya sea desde pruebas de campo o de forma analítica. Reese y Van Impe (2001) partieron desde los trabajos de Baldi et al. (1986) y Robertson et al. (1989), y desarrollaron una relación simplificada para estimar el módulo horizontal de subrasante para pilotes que desplazan utilizando el módulo del dilatómetro de Marchetti $E_{DMT} = 34.7 (p_1 - p_0)$; p_1 y p_0 son medidas del dilatómetro. El módulo horizontal de subrasante a la profundidad de prueba del dilatómetro es:

$$E_{py} = F \cdot E_{DMT} \quad (0.40)$$

donde:

F = 2 para arena sueltas;

F = 5 para arenas densas; y

F = 10 para arcillas N.C.

Vesic (1961) trató de tomar en consideración la continuidad del suelo relacionando el módulo horizontal de subrasante con el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson del suelo. Vesic comparó resultados de análisis de una viga horizontal infinita en una fundación elástica con los resultados obtenidos utilizando la teoría de Winkler, y obtuvo la siguiente relación la cual depende del ancho del pilote:

$$k D = \frac{0.65 E_s}{(1 - \mu^2)} \left[\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{12}} = E_{py} \quad (0.41)$$

donde:

E_s = módulo de elasticidad del suelo;

μ = módulo de Poisson del suelo;

D = diámetro del pilote; y

$E_p I_p$ = rigidez a la flexión del pilote.

Broms (1964), Francis (1964) y Bolows (1968), sugieren que la relación establecida por Vesic (1961) puede ser aplicada a pilotes. Por otro lado, Francis (1964) recomienda que, como los pilotes en la realidad están rodeados de suelo en todas sus caras, el factor 0.65 de la Ecuación 2.43 debería ser el doble, y recomienda un valor de 1.3 en lugar del 0.65 expresado por Vesic.

Yoshida y Yoshinaka (1972), determinaron una relación del coeficiente de subrasante al combinar los resultados de determinar dicho módulo desde pruebas de placa horizontal, y desde analizar bastantes pruebas de cargas laterales a pilotes de acero y hormigón. La ecuación para determinar el coeficiente de subrasante para fines de diseño es:

$$k = \alpha' E_s \left(\frac{1}{D_0} \right) \left(\frac{D}{D_0} \right)^{\frac{3}{4}(m-1)} \cdot y_f^{-m}; \text{ en (kg/cm}^3\text{)} \quad (0.42)$$

donde:

$$\alpha' = \frac{1.3}{(1-\mu^2)} \left[\frac{D^4}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{22}};$$

E_s = módulo de elasticidad del suelo promedio evaluado desde la superficie del terreno hasta el punto de cero desplazamiento o punto de pivote del pilote;

D_0 = diámetro de referencia; $D_0 = 30$ cm;

D = diámetro del pilote;

m = constante que depende del tipo de instalación del pilote y el tipo de suelo (Tabla 2-5);

y_f = deflexión en la cabeza del pilote.

La Ecuación 2.44 toma en cuenta las propiedades del suelo y del pilote, el tipo de instalación del pilote, el ancho del pilote y el estado de esfuerzos-deformación del pilote.

Tabla 2-5. Valores experimentales de la constante m (adaptado de Yoshida y Yoshinaka 1972).

	Pilotes Hincados	Fustes Barrenados (Vaciado <i>in-situ</i>)	m
Condición del suelo	Elástico	-	0 – 0.3
	Sedimentos diluviales, o arcillas y suelos arcillosos	-	0.3 – 0.4
	Arenas y suelos arenosos	Generalmente	0.4 - 0.5

	-	En caso de que $y_f > 20$ cm	0.5 – 0.7
	Plástico	-	0.7 - 1

Autores como Carter (1984) y Ling (1988) convergen en que el valor del factor 0.65 de la Ec. 2.43 debe ser aumentado. Estos establecen que como en la realidad cuando el pilote es cargado lateralmente, no todas las caras están en contacto con el suelo, pero, el esfuerzo cortante que se genera a ambos lados del pilote es algo que contribuye en la resistencia del suelo. En vista de esto, Carter y Ling encontraron que el mejor estimado del módulo horizontal de subrasante era utilizando un factor de 1 y no de 1.3 como habían recomendado otros autores. Finalmente, Ling (1988) establece una relación del módulo horizontal de subrasante que es linealmente proporcional al diámetro del pilote y se calcula con:

$$E_{py} = \frac{1.0 E_s D}{(1 - \mu^2) D_{ref}} \left[\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (0.43)$$

donde:

$$D_{ref} = 1.0 \text{ m.}$$

Como hemos visto en esta sección, existen diferentes formas de calcular el módulo horizontal de subrasante. Algunos autores establecen que este módulo solo depende del tipo de suelo y recomiendan valores tabulados del mismo, otros autores establecen que este módulo depende del tipo de suelo y de las propiedades del pilote y establecen ecuaciones para calcular el mismo. Se necesita juicio ingenieril para determinar cual método es el indicado para obtener la mejor aproximación del módulo horizontal de subrasante que mejor modela las presiones que se generan al cargar pilotes lateralmente.

2.6. Revisión de la literatura relacionada a la influencia de la rigidez a la flexión del pilote en la reacción del suelo

En pilotes largos, la rigidez a la flexión del pilote (EI) juega un papel importante en la forma deflectada del pilote. Se ha demostrado que la relación entre el EI del pilote y la deflexión asociada a una carga x es inversamente proporcional, esto es, mientras más rígido sea el pilote menos se deformará y viceversa. Un punto importante que se debe tener en cuenta es el punto de cero deflexión o punto de pivote del pilote. La ubicación de este punto bajo el nivel del terreno depende directamente del EI del pilote, y juega un papel muy importante en el análisis utilizando el MCD. Como vimos en la sección 2.4.1, este punto define la altura de la cuña pasiva, y por ende, restringe la zona donde se generan los momentos y las reacciones del suelo más significativas, por esta razón, es la zona de mayor interés cuando analizamos pilotes cargados lateralmente. Este punto de pivote generalmente se encuentra a una profundidad entre 6 a 10 veces el diámetro del pilote.

Cuando un pilote flexible es sometido a cargas laterales considerables, éste suele generar una cuña pasiva con una profundidad menor a la que generaría un pilote más rígido a la misma cantidad de deflexión lateral, esto es porque, para que un pilote rígido pueda deflectarse la misma cantidad que uno flexible, éste debe desplazar mucho más suelo y por ende el tamaño de la cuña pasiva crece.

Por otro lado, como se presentó más temprano en esta sección, la formulación de las curvas p-y para cualquier tipo de suelo no toma en cuenta la rigidez a la flexión del pilote. Como el método de las curvas p-y es uno de los más utilizados en la práctica geotécnica actual, es importante saber si el EI del pilote es una propiedad sensitiva o no en la respuesta del suelo. Diferentes autores han investigado sobre el tema de forma analítica, pero hasta ahora, no se han podido encontrar estudios detallados de la influencia de la rigidez a la flexión en la reacción del suelo desde datos experimentales a escala real.

2.6.1. Estudio de Ashour y Norris (2000)

Ashour y Norris (2000) determinaron curvas p-y para casos hipotéticos utilizando el MCD. Estos autores analizaron la influencia del EI del pilote en la respuesta del suelo para pilotes con diferentes EI (manteniendo el mismo diámetro) en diferentes tipos de suelos tales como arcillas suaves, arcillas rígidas, arenas sueltas y arenas densas, estos llegaron a las siguientes conclusiones: para el caso de pilotes en arenas densas, la rigidez a la flexión del pilote tiene un gran efecto en la respuesta del suelo y un efecto moderado para el caso de arenas sueltas; la rigidez a la flexión del pilote tiene un mayor efecto en el caso de arcillas rígidas y un efecto pequeño en el caso de arcillas suaves. Las curvas p-y determinadas por estos autores utilizando el MCD predicen valores mucho mayores de resistencia última del suelo para pilotes rígidos en arenas densas o arcillas rígidas en comparación con los valores de reacción última calculados para pilotes flexibles en los mismos tipos de suelo. Estos autores realizaron el mismo ejercicio de analizar pilotes hipotéticos con distintos EI pero ahora en el caso de un suelo real. La Figura 2-20 muestra las curvas p-y determinadas para pilotes con diferentes EI en el suelo del sitio de prueba de la isla Mustang, Texas a una profundidad de 1.83 m.

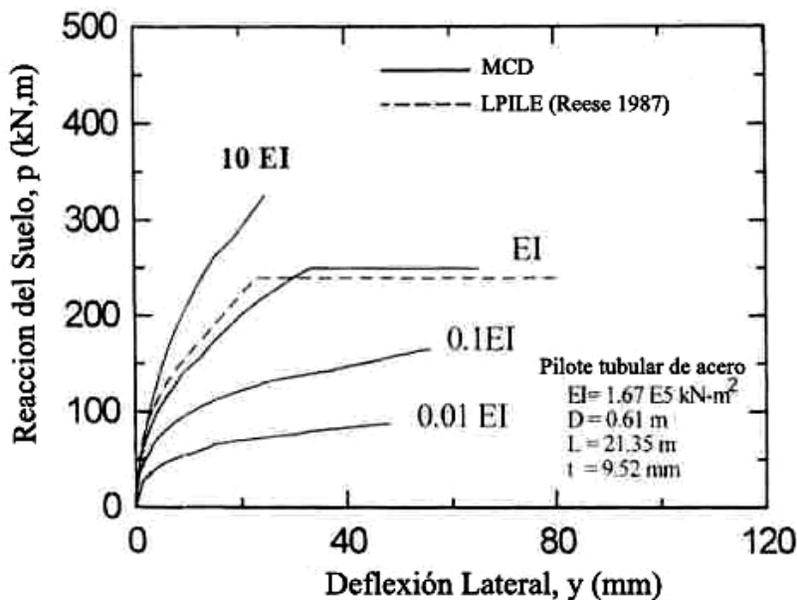


Figura 2-20. Efecto del EI del pilote en la respuesta del suelo a una profundidad de 1.83 m en el suelo del sitio de prueba de la isla Mustang, Texas (adaptado de Ashour y Norris 2000).

De esta figura se puede notar que la curva p-y se va rigidizando a medida que el EI del pilote aumenta, de igual forma, para el pilote más flexible la resistencia última generada es mucho menor a la que se genera con el pilote más rígido.

Estos autores también analizaron la influencia del EI sobre las curvas p-y utilizando diferentes valores de rigidez a la flexión de pilotes hipotéticos instalados en la misma estratigrafía del sitio de prueba del río Sabine, Texas, cuyo suelo predominante es arcilla suave. Se utilizaron los mismos principios de análisis anterior mente descritos. Las curvas p-y obtenidas por estos autores son mostradas en la Figura 2-21.

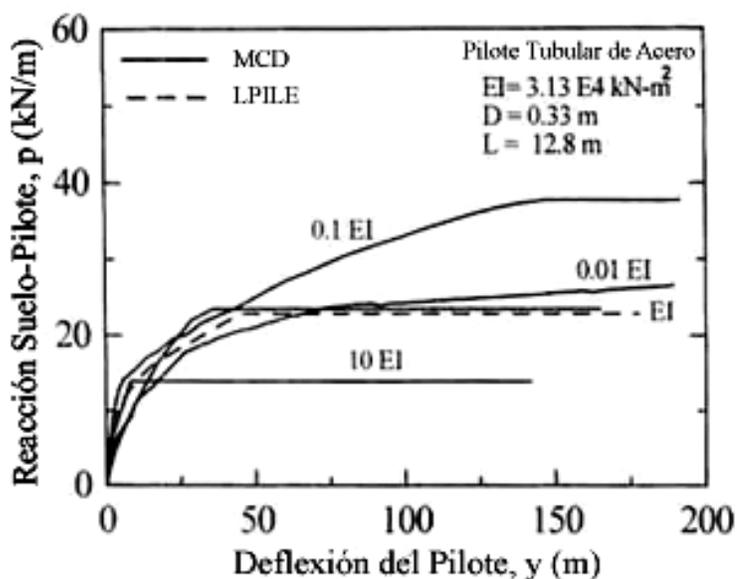


Figura 2-21. Efecto del EI del pilote en la respuesta del suelo a una profundidad de 0.915 m en el suelo del sitio de prueba del río Sabine, Texas (adaptado de Ashour y Norris 2000).

Ashour y Norris (2000) llegaron a la conclusión de que un pilote rígido (10 EI) no interactúa bien en esta arcilla suave. Bajo este EI, una mayor y más profunda cuña pasiva es generada, esto causa que ocurra una falla del tipo flujo a través del pilote, ocasionando una baja reacción última suelo-pilote generada a bajos niveles de deflexión lateral. Un pilote menos rígido (0.1 EI), interactúa mejor con esta arcilla suave, presentando un menor tamaño y profundidad de la cuña pasiva. Esto se traduce en un aumento en la reacción última suelo-pilote y una mayor cantidad de deflexión necesaria para que se genere la falla del tipo flujo a través del pilote. Para

un pilote más flexible ($0.01 EI$), una mucho mayor cantidad de deflexión es necesaria para que ocurra flujo a través del pilote, esto ocasiona que la curva p-y adquiera mucho más ductilidad que las anteriores y presente una disminución en el valor de la reacción última suelo-pilote.

Como hemos visto en esta sección algunos autores reportaron que la rigidez a la flexión del pilote no es un parámetro sensitivo en la reacción del suelo, por otro lado, otros autores piensan lo contrario, de que el EI del pilote si es un factor sensitivo en la reacción del suelo y las curvas p-y. Esta ambigüedad es una de las motivaciones principales de esta tesis y la misma nos hace generar la misma pregunta; ¿Es la rigidez a la flexión del pilote un parámetro sensitivo en la respuesta del suelo?

2.6.2. Estudio de Fan y Long (2005)

Estos autores determinaron la influencia del EI del pilote en la reacción del suelo de forma analítica utilizando el método de elementos finitos no-lineal. Fan y Long modelaron pilotes hipotéticos en suelos arenosos utilizando un programa basado en elementos finitos llamado PILE 3D. Estos utilizaron un modelo elasto-plástico para la arena y un elemento delgado de espesor igual al 6% del diámetro del pilote distribuido en todo el perímetro del pilote cuya función es modelar la interface suelo-pilote. Los pilotes fueron modelados como materiales en el rango lineal elástico. El estado inicial del suelo fue asumido como estado de reposo (K_0), lo que quiere decir que no se tomó en cuenta el efecto del tipo de instalación de los pilotes.

Para analizar la influencia del EI en la respuesta, estos autores utilizaron pilotes hipotéticos con valores de EI iguales a 1.7×10^6 , 1.7×10^5 , 1.7×10^4 kN-m² y un pilote rígido. Para calcular los diferentes EI estos autores fijaron un solo diámetro del pilote y asumieron que la inercia del pilote permanece constante y que lo único que variaba era el módulo de elasticidad del pilote. La Figura 2-22 muestra las curvas p-y obtenida por Fan y Long (2005). Estos autores llegaron a la conclusión que para suelos arenoso, la rigidez a la flexión del pilote no es un parámetro sensitivo en la reacción del suelo y por ende en las curvas p-y.

Fan y Long (2005) también estudiaron la influencia de variar el módulo de subrazante (K) sobre la reacción del suelo y las curvas p-y. El análisis fue llevado a cabo utilizando el mismo programa en elementos finitos y las mismas propiedades del suelo y del pilote. Para 3 diferentes

valores de K , estos autores obtuvieron curvas p - y a diferentes profundidades (Figura 2-23) y llegaron a la conclusión de que a mayores valores de K , la pendiente inicial de la curva p - y se iba haciendo más rígida lo cual se traducía en un cambio en la forma o rigidez de la curva p - y a la misma profundidad. También apreciaron un cambio significativo en el valor de la reacción última del suelo y concluyeron que se la relación entre el valor de K y la reacción última suelo-pilote es directamente proporcional, esto es, a mayor valor de K , mayor será el valor de la reacción última del suelo.

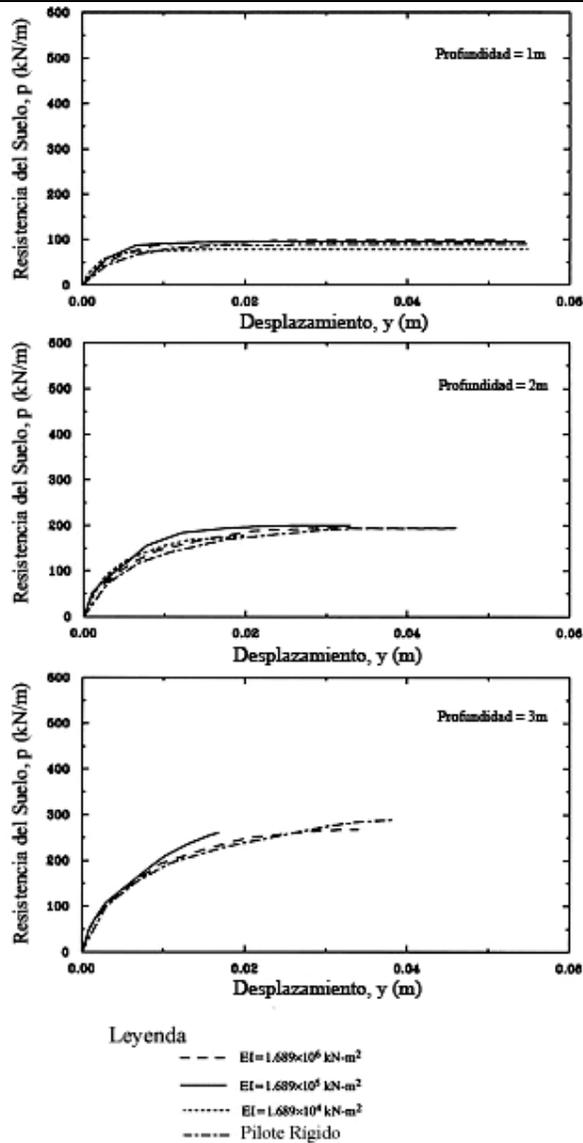


Figura 2-22. Curvas p-y para distintos EI determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Fan y Long 2005).

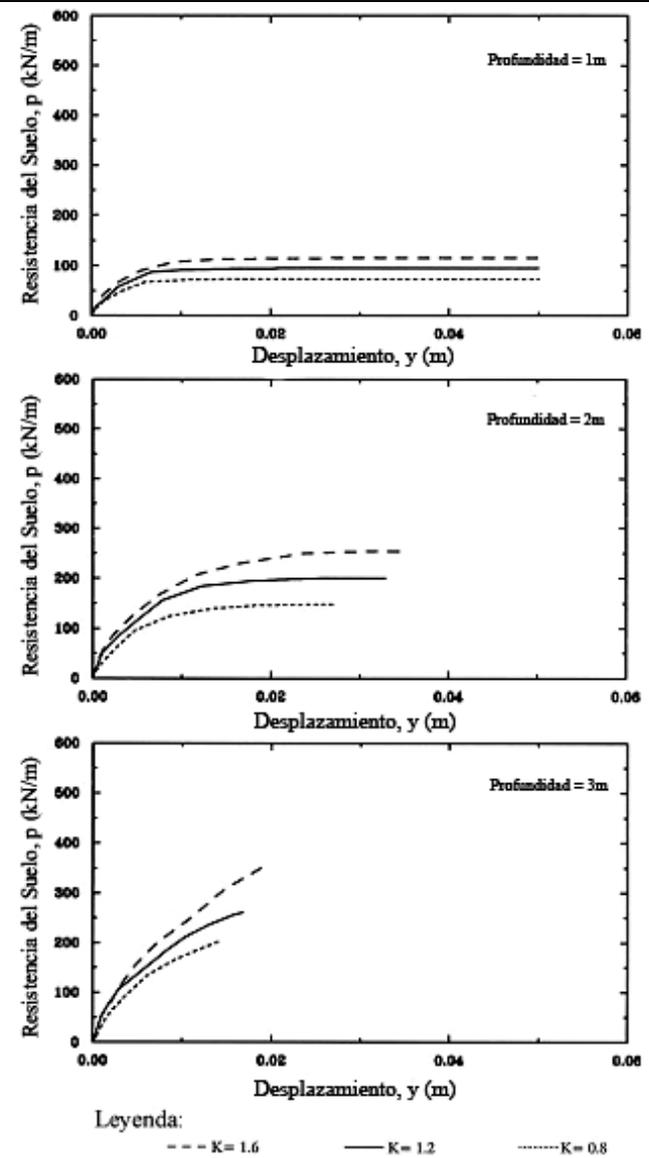
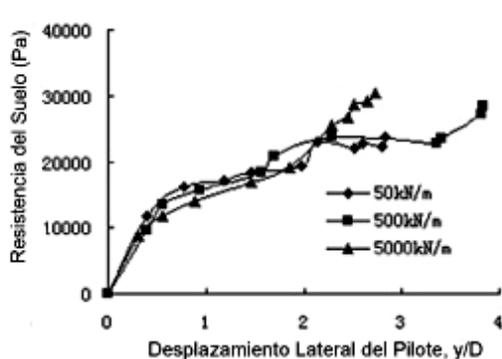


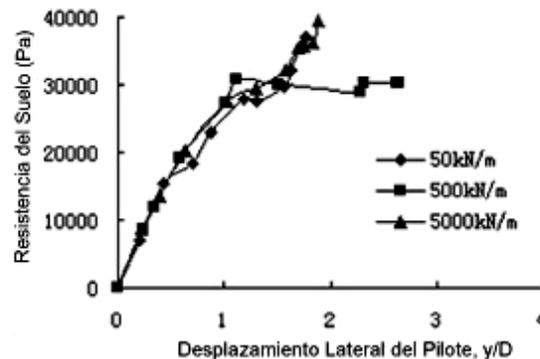
Figura 2-23. Curvas p-y para distintos EI determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Fan y Long 2005).

2.6.3. Estudio de Xiao y Wang (2007)

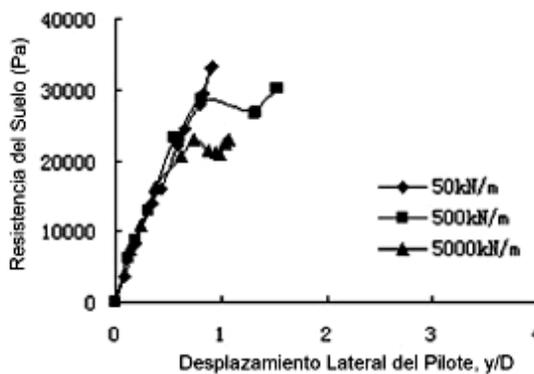
Xiao y Wang (2007) determinaron la influencia del EI en la respuesta del suelo en arenas analíticamente utilizando el método de partículas discretas en tres dimensiones. Estos autores utilizaron un modelo en escala reducida de un pilote cargado lateralmente en un suelo arenoso. Un diámetro equivalente al de un pilote de 0.6 m fue utilizado en el análisis. La rigidez a la flexión del pilote fue modelada como una rigidez de conexión entre el pilote y las partículas de suelo expresado en kN/m. El nivel de densidad del suelo fue expresado en términos de un coeficiente de fricción. Para la determinación de las curvas p-y estos autores utilizaron 10 diferentes incrementos en carga. La Figura 2-24 muestra las curvas p-y a diferentes profundidades obtenidas por estos autores.



a) Profundidad = 0.31L



b) Profundidad = 0.46L



c) Profundidad = 0.62L

Figura 2-24. Curvas p-y para distintas rigideces de contacto determinadas a diferentes profundidades (adaptado de Xiao y Wang 2007).

Xiao y Wang (2007) llegaron a la conclusión de que la rigidez a la flexión del pilote no es un parámetro sensitivo en la respuesta del suelo. Sin embargo, de la Figura 2-24 se puede apreciar que para los diferentes valores de la rigidez de contacto, no existe consistencia entre los valores de la reacción última del suelo a diferentes profundidades.

2.7. Resumen

En este capítulo de revisión de literatura se presentó la derivación de la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente basado en teoría de vigas, y se citaron las características principales de dos métodos para análisis de pilotes bajo carga lateral los cuales están basados básicamente en los mismos principios de resolución de la ecuación diferencial. Estos dos métodos son el de las curvas p-y y el de la cuña de deformación (MCD). También se habló del módulo horizontal de subrasante el cual es un parámetro que juega un papel muy importante en la determinación de las reacciones del suelo tanto en el método de las curvas p-y no lineales como en el método de la cuña de deformación. Otro punto importante que se tocó en la revisión de literatura fue la influencia de la rigidez a la flexión en la reacción del suelo. A continuación se presenta un resumen de cada uno de los temas tocados en la revisión de literatura.

La metodología de curvas p-y no lineales es la más utilizada en la práctica para resolver el problema de pilotes cargados lateralmente. Se debe resaltar que, a pesar de que se han generado diferentes curvas p-y para diferentes tipos de suelo o roca, y se han hecho recomendaciones de modificación a las inicialmente propuestas por Reese, todas las curvas p-y tienen en común que, en su formulación, todas solo toman en cuenta las propiedades del suelo y el ancho del pilote. En la sección 2.3 se pudo observar que en la formulación de las curvas p-y solo entra en juego el ángulo de fricción interna, el γ del suelo, la profundidad y el ancho del pilote. Las curvas p-y no toman en cuenta propiedades del pilote como la sección transversal ni el EI del pilote. Como en este método el suelo se modela como resortes discretos espaciados a cierta distancia, no se toma en cuenta la continuidad del suelo, o sea que, un resorte a una

profundidad z solo considera lo que esté pasando puntualmente, sin importar lo que esté pasando en el nodo de arriba ni en el de abajo.

El método de la cuña de deformación (MCD) es un método que no es tan popular en la práctica en comparación con el de las curvas p - y , pero ha demostrado ser un método bastante efectivo en el análisis de pilotes cargados lateralmente. Como vimos en detalle en la sección 2.4, este método, en sus formulaciones, sí toma en cuenta la continuidad del suelo dentro de la cuña pasiva, las propiedades del suelo y del pilote. También se presentó la capacidad de este método de generar sus propias curvas p - y las cuales toman en cuenta las propiedades del suelo y del pilote. El MCD ha sido seleccionado en esta tesis porque lo hemos considerado como un método efectivo que nos permitirá cuantificar la influencia de la variación del EI del pilote en la reacción del suelo.

El módulo horizontal subrasante es la representación de la presión que se genera entre el pilote y el suelo cuando éste es cargado lateralmente. Este módulo es muy importante en la determinación de la respuesta del suelo ya que ambos métodos (curvas p - y y MCD) lo utilizan como la pendiente inicial de la curva que representa la respuesta del suelo. A diferencia del MCD el cual se generó principalmente para determinar el perfil de la variación no lineal de este módulo con la profundidad, en el método de las curvas p - y el usuario debe introducir el valor de este módulo de forma manual. Como se presentó en la sección 2.5, diferentes autores recomiendan distintas formas de determinar este módulo, algunos autores establecen que este módulo solo depende del tipo de suelo y recomiendan valores tabulados del mismo, otros autores establecen que este módulo depende del tipo de suelo y de las propiedades del pilote y establecen ecuaciones para calcular el mismo.

La rigidez a la flexión del pilote es un parámetro que influye directamente en la forma deflectada del pilote y en el tamaño de la cuña pasiva que se genera en la parte delantera del mismo cuando éste es cargado lateralmente. Se ha demostrado que la relación entre el EI del pilote y la deflexión asociada a una carga x es inversamente proporcional. Por otro lado, la influencia del EI del pilote en la respuesta del suelo es algo que se ha sido estudiado analíticamente por diferentes autores, y se ha creado cierta ambigüedad al respecto. Algunos autores concluyeron que el EI del pilote no es un parámetro sensitivo en la respuesta del suelo,

pero otros autores concluyen que éste si es un parámetro sensitivo en la respuesta del pilote. Es precisamente esta falta de consenso o acuerdo la que motiva la formulación de esta tesis.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS SOBRE LA INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ A LA FLEXIÓN ANALIZANDO PILOTES HIPOTÉTICOS

3.1. Introducción

La rigidez a la flexión del pilote (EI) es una propiedad del pilote que tiene que ver con la facilidad del mismo a flexionarse o deformarse lateralmente cuando éste es sometido a cargas laterales. Como esta propiedad del pilote no es tomada en cuenta en la metodología de las curvas p-y para analizar pilotes cargados lateralmente, es de sumo interés determinar cuál es la influencia de esta propiedad del pilote sobre las reacciones del suelo. Este capítulo presenta un estudio de la influencia del EI en la reacción del suelo y las curvas p-y utilizando un programa de computadora llamado SWM 6.1 el cual estaba basado en el método de la cuña de deformación (MCD) explicado en detalle en el Capítulo 2. El estudio consistió en analizar casos hipotéticos de pilotes del mismo diámetro y longitud pero diferentes EI cargados lateralmente embebidos en suelos arenosos con diferentes densidades. A continuación se presentan una descripción general del programa SWM 6.1, así como los detalles de los análisis realizados tanto para pilotes modelados con EI lineal, como para pilotes modelados con EI no lineal embebidos en arena suelta, medianamente densa y densa.

3.2. Programa SWM 6.1 basado en el MCD

El programa SWM 6.1 desarrollado por Ashour et al. (1998b) está basado en el método de la cuña de deformación el cual fue explicado en detalle en el Capítulo 2. Este es un programa relativamente fácil de usar porque no se necesitan tantas propiedades del suelo y del pilote para realizar un análisis. Este programa es capaz de proporcionar el perfil de deflexión, momento, cortante y las reacciones del suelo a lo largo del pilote. También éste es capaz de generar curvas

p-y a 5 diferentes profundidades por debajo de la superficie del terreno. Para la realización de un análisis con este programa, para pilotes individuales, se deben introducir propiedades del pilote tales como diámetro, longitud, sección transversal, EI (puede ser lineal o no lineal) y tipo de restricción en la cabeza del pilote. Si se elige el tipo de análisis utilizando un EI lineal, se debe elegir el tipo de material del pilote como acero, hormigón o madera y dimensiones de la sección transversal, y éste calcula internamente el valor del EI del pilote. Por otro lado si se elige utilizar EI no lineal se debe especificar el tipo de sección transversal, material y dimensiones del pilote. En el caso de un pilote de hormigón armado por ejemplo, se debe especificar también la razón de acero longitudinal. Habiendo especificado todo lo necesario, el programa genera la relación momento-curvatura del pilote y efectúa el análisis basado en esa degradación del EI con las cargas aplicadas. Un tipo de análisis que no está incluido en la versión regular de este programa, es la de poder introducir cualquier tipo de relación momento-curvatura deseada por el usuario. Este modo de análisis fue incorporado por el Dr. Mohamed Ashour especialmente para esta investigación. Las propiedades del suelo necesarios para el análisis son el tipo de suelo (granular, cohesivo, suelos con cohesión y fricción, y suelos licuables) peso específico efectivo, propiedades de resistencia del suelo y la deformación al 50% del esfuerzo desviador de falla en el ensayo triaxial. Nótese que para el análisis no es necesario introducir curvas p-y ni el módulo de subrasante necesarios en el análisis con LPILE o FB-Pier.

Las curvas p-y determinadas con SWM 6.1 toman en cuenta las propiedades del suelo y propiedades del pilote tales como la forma de la sección transversal y el EI del pilote. La capacidad de este programa de generar sus propias curvas p-y ha sido validada y presentada en Ashour y Norris (2000), Ashour et al. (2002) y Ashour et al. (2006) donde presentan comparaciones de curvas p-y determinadas utilizando el MCD y las determinadas en pruebas de cargas de pilotes bien instrumentados en los sitios de prueba de la isla Mustang (suelos arenosos) y el río Sabine (suelos arcillosos) ambos ubicados en Texas.

3.3. Influencia de la rigidez a la flexión en pilotes compuestos por materiales lineales

Para tratar de entender cuál es la influencia del EI sobre la reacción del suelo en pilotes cargados lateralmente instalados en suelos arenosos, se decidió inicialmente analizar pilotes del mismo diámetro, misma longitud, e instalados en el mismo tipo de suelo (arena suelta, medianamente densa y densa). La única propiedad del pilote que varía en el análisis es el EI del pilote el cual fue asumido constante o sea que no hay degradación del mismo a medida que aumentan los momentos internos de la sección.

3.3.1. Arena suelta

Para el análisis en arena suelta se asumió que era un estrato de arena suelta, limpia y sin presencia del nivel freático. La Tabla 3-1 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes tubulares con EI constante. Los valores de EI fueron calculados internamente por SWM, éstos fueron variados solo cambiando el espesor del tubo. El diámetro y la profundidad del pilote se mantuvieron intactos en todos los análisis realizados. Los valores de ϵ_{50} son calculados internamente por el SWM por una ecuación que toma en cuenta las propiedades del suelo y el nivel de esfuerzos verticales efectivos. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-1. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena suelta.

EI (kN-m ²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
1.41E6 (EI)	1.22	18	20	Arena	15.7	30	Por defecto
1.41E5 (0.1EI)	1.22	18	20	Arena	15.7	30	Por defecto
1.41E7 (10EI)	1.22	18	20	Arena	15.7	30	Por defecto

La Figura 3-1 muestra la forma deflectada de los pilotes para los diferentes EI. La rigidez a la flexión del pilote influye directamente en la posición del punto de cero deflexión (punto de pivote). Éstos exhiben una relación directamente proporcional, esto es, a mayor EI más profunda será la ubicación del punto de cero deflexión. El pilote más flexible (0.1EI) presenta una menor profundidad de la cuña pasiva, por esto este pilote tiende a movilizar menor cantidad de suelo. Por otro lado, el pilote más rígido (10EI) presenta una profundidad de la cuña pasiva mucho mayor y por ende moviliza mayor cantidad de suelo. En este suelo de arena suelta, la diferencia entre la cantidad de suelo movilizado entre los tres pilotes parece ser significativa. El EI del pilote también influye directamente en la cantidad de deflexión lateral de los pilotes: éstos presentan una relación inversamente proporcional, a mayor EI menor cantidad de deflexión. Se debe notar que para que estos pilotes se deflecten aproximadamente la misma cantidad, a medida que va aumentando el EI de los pilotes se necesita un aumento significativo en la carga lateral.

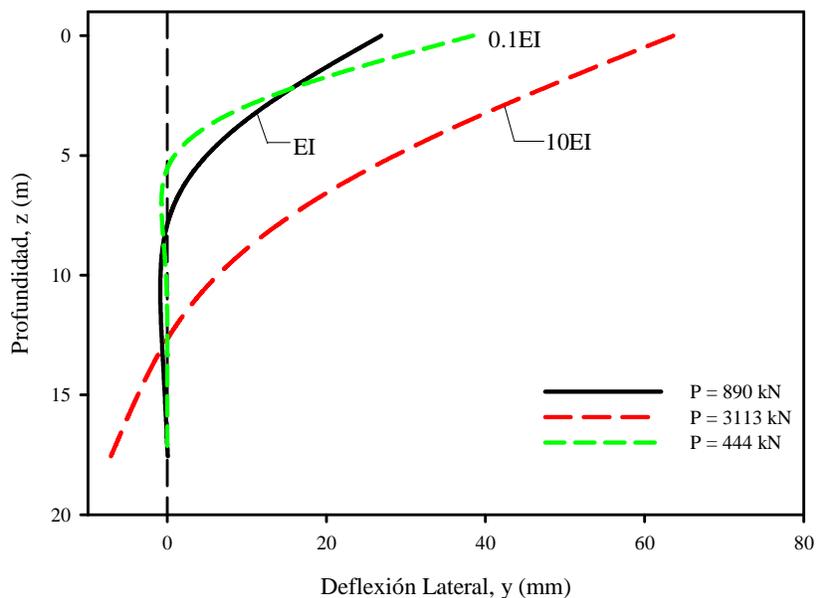


Figura 3-1. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena suelta.

Las curvas p-y a diferentes profundidades determinadas utilizando el programa SWM 6.1 se presentan en la Figura 3-2. Estas curvas p-y presentan ligeras diferencias entre las pendientes iniciales de las curvas p-y de cada pilote también representado por el módulo de subrasante. A medida que se determinan estas curvas p-y a mayor profundidad, la reacción del suelo va

aumentando y la deflexión y va disminuyendo. Debido a que el pilote de menor EI ($0.1EI$) moviliza menor cantidad de suelo, al determinar las curvas p-y a una profundidad de 3 m (Figura 3-2c) se obtiene una curva muy limitada en deflexión, esto es porque el punto de cero deflexión se encuentra muy cercano a estos 3 metros y es una zona donde el pilote está experimentando poca deflexión lateral. Para los otros dos pilotes la determinación de las curvas p-y a esa profundidad no es problema, porque su punto de pivote está lo suficientemente lejos como para que se presenten deflexiones significativas. En general, de acuerdo con los resultados obtenidos, en arenas sueltas la forma de las curvas p-y no se ve muy afectada por el EI del pilote si estas son determinadas a una profundidad no muy cercana al punto de pivote del pilote. Sin embargo, eventualmente las reacciones del suelo y la reacción última (la cual no se muestra en ninguna de estas curvas p-y) si se verán afectadas. Pilotes más rígidos podrán generar mayores reacciones en el suelo y este efecto va aumentando bastante rápido con la profundidad.

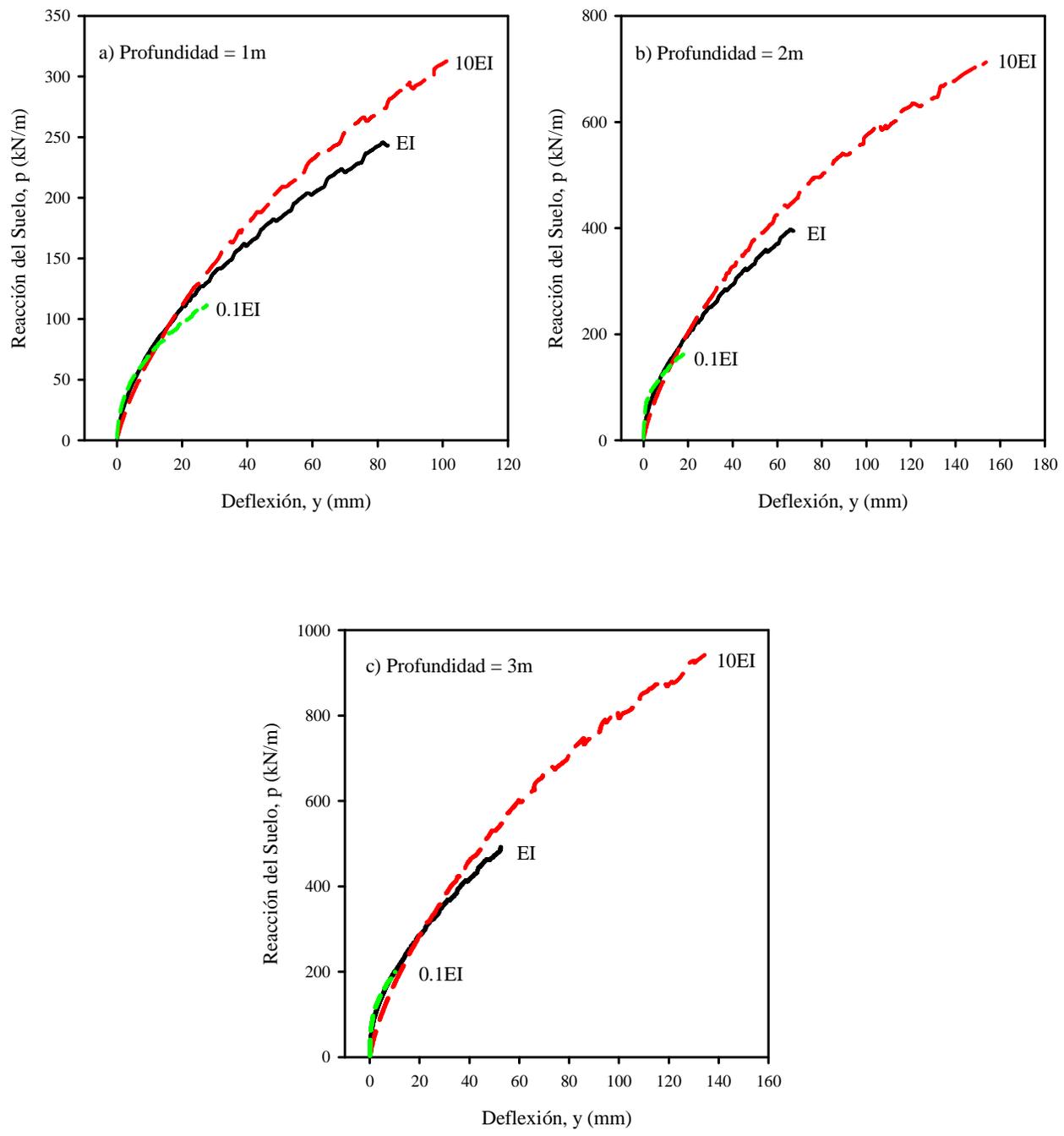


Figura 3-2. Curvas p-y en arena suelta para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.3.2. Arena medianamente densa

Para el análisis en arena medianamente densa se asumió que era un estrato de arena medianamente densa, limpia y sin presencia del nivel freático. La Tabla 3-2 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes tubulares con EI constante. Los valores de EI fueron calculados internamente por SWM; éstos fueron variados solo cambiando el espesor del tubo. El diámetro y la profundidad del pilote se mantuvieron intactos en todos los análisis realizados. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-2. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena medianamente densa.

EI (kN-m²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
1.41E6 (EI)	1.22	18	20	Arena	18.4	35	Por defecto
1.41E5 (0.1EI)	1.22	18	20	Arena	18.4	35	Por defecto
1.41E7 (10EI)	1.22	18	20	Arena	18.4	35	Por defecto

La Figura 3-3 muestra la forma deflectada de los pilotes para los diferentes EI. El EI del pilote influye directamente en la posición del punto de cero deflexión (punto de pivote). El pilote más flexible (0.1EI) presenta una menor profundidad de la cuña pasiva; por esto este pilote tiende a movilizar menor cantidad de suelo. Por otro lado, el pilote más rígido (10EI) presenta una profundidad de la cuña pasiva mucho mayor y por ende moviliza mayor cantidad de suelo. En este suelo de arena medianamente densa, la diferencia entre la cantidad de suelo movilizado entre los tres pilotes es menos significativa que para un suelo de arena suelta. Se debe notar que al igual que para arena suelta, para que estos pilotes se deflecten aproximadamente la misma cantidad, a medida que va aumentando el EI de los pilotes se necesita un aumento significativo en la carga lateral.

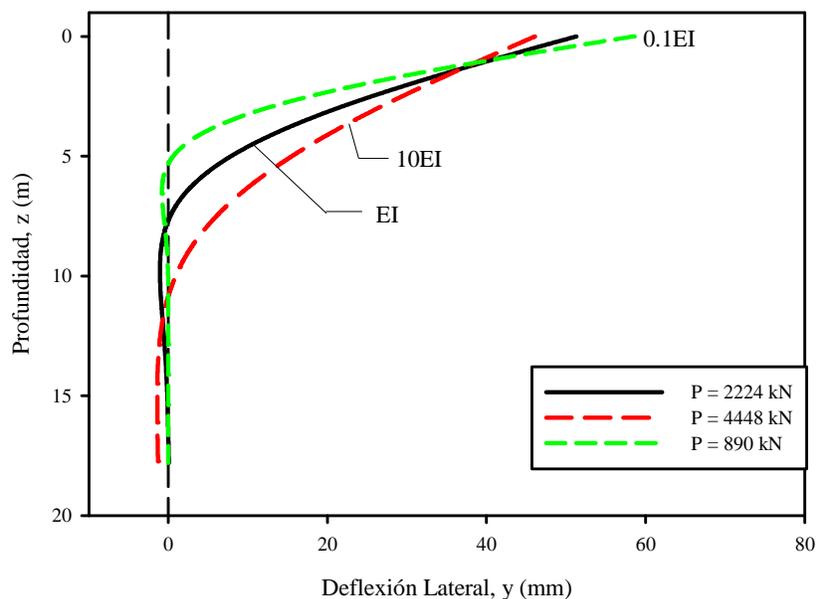


Figura 3-3. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.

Las curvas p-y a diferentes profundidades determinadas utilizando el programa SWM 6.1 se presentan en la Figura 3-4. Estas curvas p-y presentan mínimas diferencias entre las pendientes iniciales de cada curvas p-y también representado por el módulo de subrasante. A medida que se determinan estas curvas p-y a mayor profundidad, la reacción del suelo va aumentando y la deflexión va disminuyendo. Debido a que el pilote de menor EI (0.1EI) moviliza menor cantidad de suelo, al determinar las curvas p-y a una profundidad de 3 m (Figura 3-4c) se obtiene una curva muy limitada en deflexión; esto es porque el punto de cero deflexión se encuentra muy cercano a estos 3 metros y ésta es una zona donde el pilote está experimentando poca deflexión lateral. En general, de acuerdo con los resultados obtenidos, en arenas medianamente densas la forma de las curvas p-y se ve algo afectada por el EI del pilote si éstas son determinadas a una profundidad no muy cercana al punto de pivote del pilote. Por otro lado, se va notando una diferencia más significativa entre las reacciones del suelo generadas para cada pilote. Pilotes más rígidos podrán generar mayores reacciones en el suelo y este efecto va aumentando bastante rápido con la profundidad.

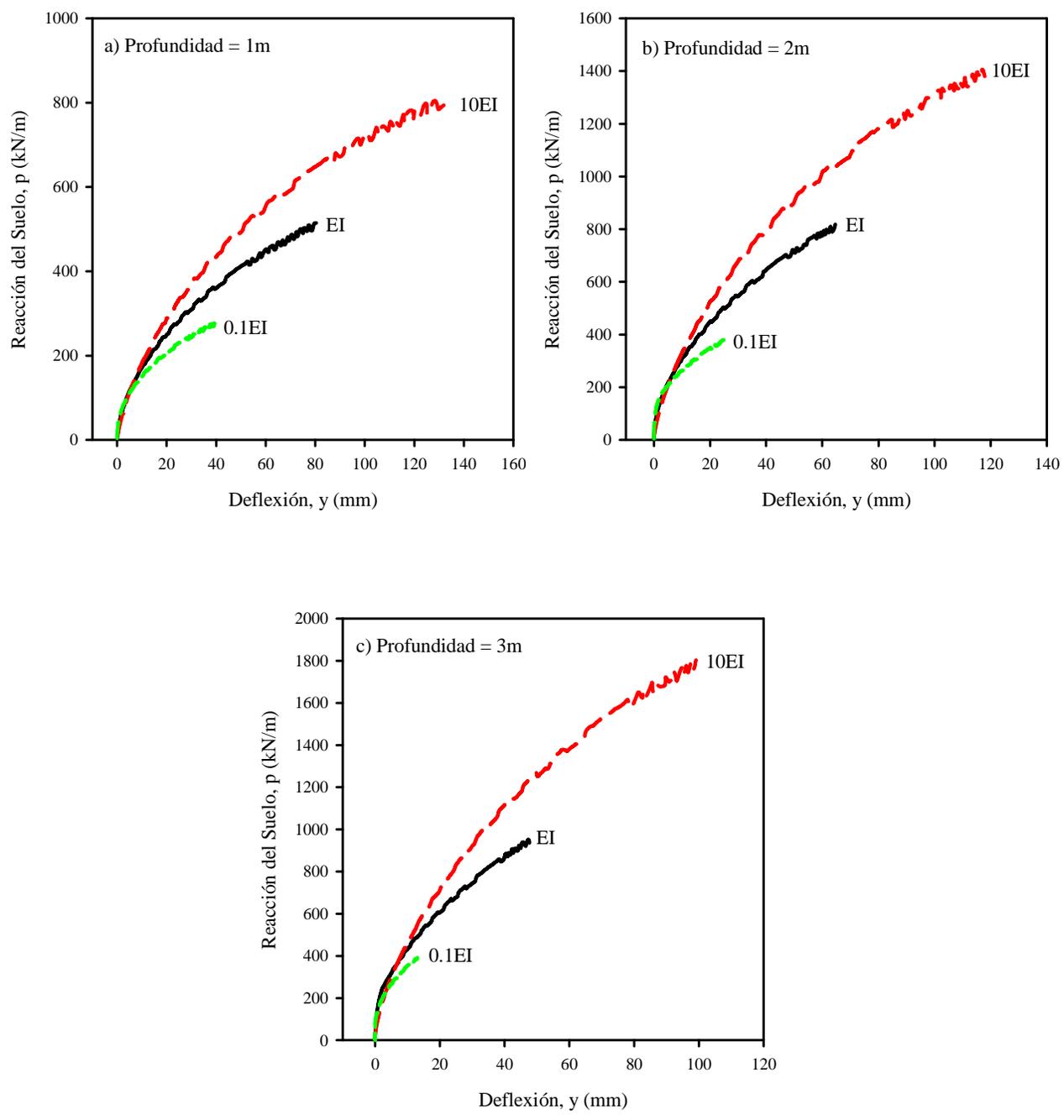


Figura 3-4. Curvas p-y en arena medianamente densa para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.3.3. Arena densa

Para el análisis en arena densa se hicieron las mismas suposiciones que para los otros dos casos anteriores. La Tabla 3-3 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes tubulares con EI constante. Los valores de EI fueron calculados internamente por SWM; éstos fueron variados solo cambiando el espesor del tubo. El diámetro y la profundidad del pilote se mantuvieron intactos en todos los análisis realizados. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-3. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes en arena densa.

EI (kN-m ²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
1.41E6 (EI)	1.22	18	20	Arena	20.4	40	Por defecto
1.41E5 (0.1EI)	1.22	18	20	Arena	20.4	40	Por defecto
1.41E7 (10EI)	1.22	18	20	Arena	20.4	40	Por defecto

La Figura 3-5 muestra la forma deflectada de los pilotes para los diferentes EI. Cabe notar que un pilote más rígido (10EI) presenta una profundidad de la cuña pasiva menor a la de los casos anteriores. También en los casos anteriores (arena suelta y medianamente densa) este pilote rotaba completo, obteniéndose valores de deflexiones positivos y negativos en cualquier punto del mismo, en otras palabras, se presentaba deflexión en el pie del pilote. En éste caso de arena densa, el pilote presenta un perfil de deflexión parecido al de los otros dos pilotes, esto se debe a que el suelo es lo suficientemente denso como para restringir el movimiento en el pie del pilote. Esto nos hace concluir que es necesario tomar en cuenta las propiedades del suelo y del pilote para poder decidir si un pilote cargado lateralmente va a comportarse como un pilote rígido o un pilote flexible. En este suelo de arena densa, la diferencia entre la cantidad de suelo movilizado entre los tres pilotes es menos significativa que en los suelos anteriores. Se debe notar que para que la deflexión en la cabeza del pilote sea aproximadamente la misma, a medida que va aumentando el EI de los pilotes se necesita un aumento significativo en la carga lateral.

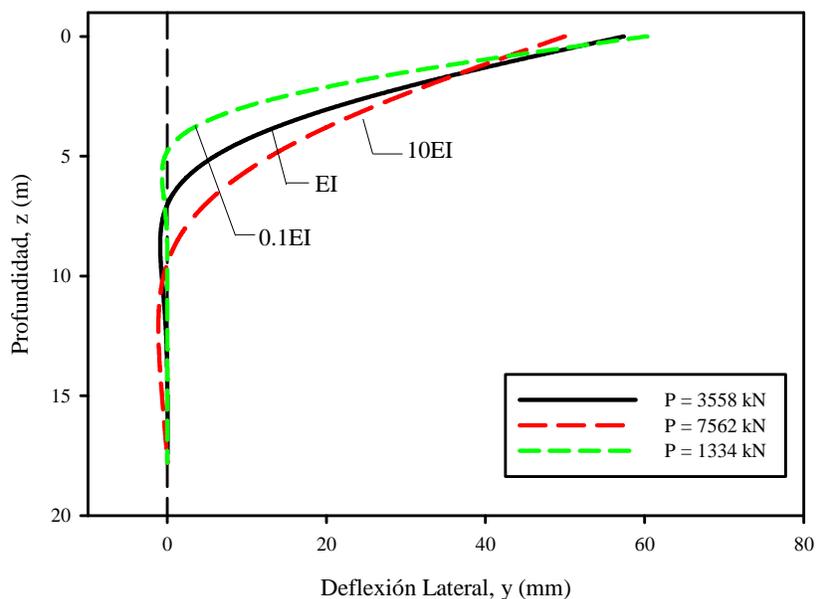


Figura 3-5. Perfil de deflexiones para los diferentes EI bajo una determinada carga lateral en arena densa.

Las curvas p-y a diferentes profundidades determinadas utilizando el programa SWM 6.1 se presentan en la Figura 3-6. Las pendientes iniciales de las curvas p-y de cada pilote son prácticamente idénticas. Se puede notar una diferencia mucho más significativa en la forma de las curvas p-y para este suelo de arena densa que para los suelos anteriores. Para los tres pilotes, las curvas p-y a cualquier profundidad reflejan una gran diferencia entre las reacciones del suelo para los 3 diferentes EI. Si tomamos como referencia una deflexión de 40 mm para las curvas p-y determinadas a 1m de profundidad (Figura 3-6a) obtenemos reacciones del suelo de aproximadamente 500, 700 y 900 kN/m para 0.1EI, EI y 10 EI respectivamente. Entre el pilote más rígido y el más flexible a esta cantidad de deformación, se presenta una diferencia entre las reacciones del suelo de hasta 400 kN/m, la cual consideramos es relativamente grande. También, como en los casos anteriores, pilotes más rígidos tendrán la capacidad de generar reacciones del suelo últimas a mayor deformación que los pilotes más flexibles. Esto quiere decir que es más fácil que se presente una falla del suelo como la de flujo a través del pilote en pilotes flexibles que en pilotes rígidos.

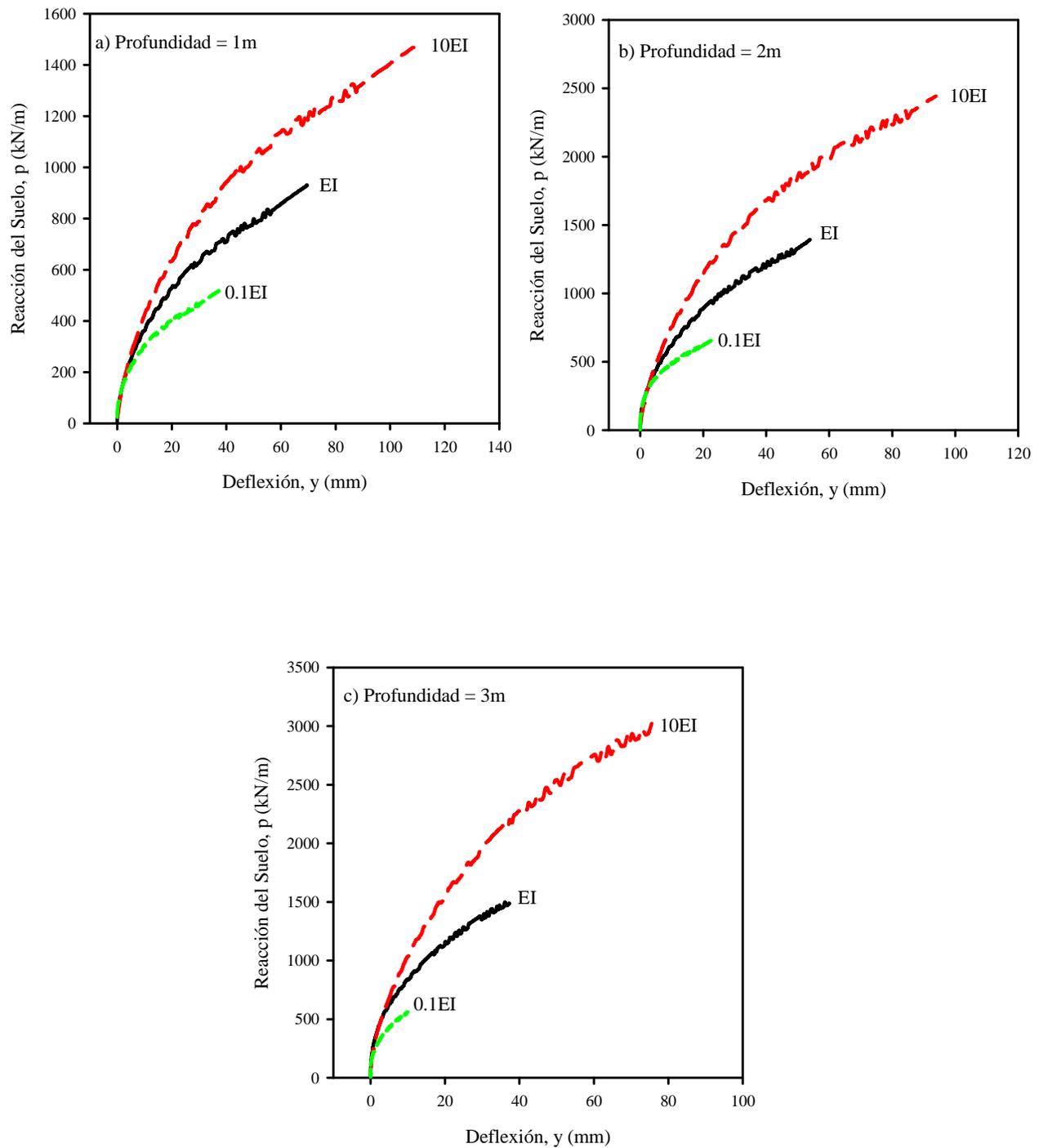


Figura 3-6. Curvas p - y en arenas densas para los diferentes EI a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.4. Influencia de la rigidez a la flexión en pilotes compuestos por materiales no lineales

En la sección anterior vimos que el EI del pilote influye en las reacciones del suelo y en la forma de las curvas p-y en pilotes compuestos por materiales lineales instalados en suelos arenosos con diferentes densidades. Es de nuestro interés determinar cuál es la influencia de la variación del EI sobre la reacción del suelo para pilotes compuestos por materiales no lineales ya que todos los materiales en la realidad exhiben un comportamiento elasto-plástico.

En esta sección se determinaran las curvas p-y utilizando dos tipos de pilotes que presentan diferentes degradaciones del EI con el momento, instalados en suelos arenosos de diferentes densidades. La relación del EI con el momento para ambos pilotes se muestra en la Figura 3-7. Para cada tipo de suelo se generaran curvas p-y a 1, 2 y 3 m de profundidad para rigideces a la flexión de 0.1EI, EI, 10EI y 100EI. En todos los casos se mantuvo la misma forma de la relación del EI con el momento. La variación del EI se realizó utilizando un factor multiplicador que aumenta o disminuye de igual manera el EI y el momento, o sea, que el pilote A de 10EI presenta la misma forma de la curva EI vs Momento que la presentada en la Figura 3-7, pero, en la cantidad de momento que el EI empieza a disminuir (cuando el momento es 400 kN para el caso de EI), para 10EI esta disminución se presenta a 4000 kN. A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados y las curvas p-y determinadas en arenas sueltas, medianamente densa y densa utilizando SWM.

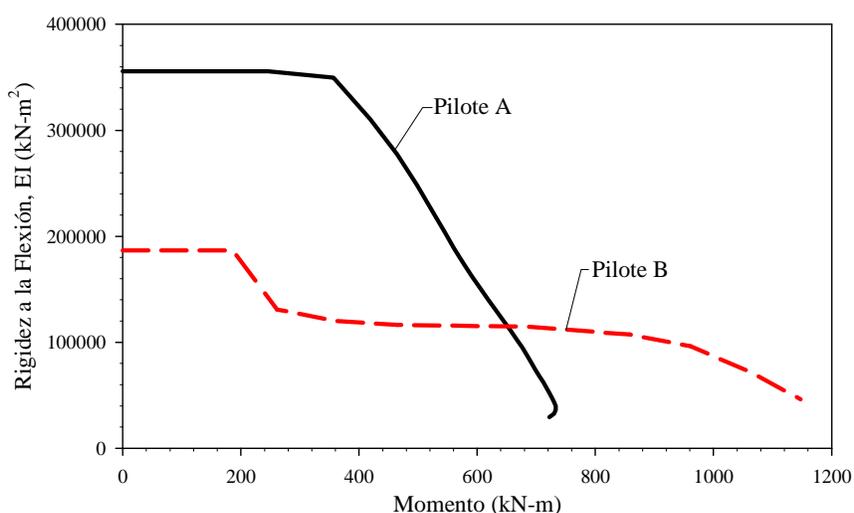


Figura 3-7. Degradación del EI con la carga aplicada para dos pilotes hipotéticos.

3.4.1. Arena suelta

Para el análisis en arena suelta se asumió que era un estrato de arena suelta, limpia y sin presencia del nivel freático. La Tabla 3-4 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes con EI variable donde se asumió que la inercia del pilote permanecía constante y lo único que variaba era el módulo de elasticidad del material. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-4. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena suelta.

	EI Inicial (kN-m ²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
Pilote A (Fig. 3-7)	3.6E5 (EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	3.6E4 (0.1EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	3.6E6 (10EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	3.6 E7 (100EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
Pilote B (Fig. 3-7)	1.8E5 (EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	1.8E4 (0.1EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	1.8E6 (10EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto
	1.8E7 (100EI)	1.22	18	20	15.7	30	Por defecto

La Figura 3-8 y 3-9 muestra las formas deflectadas de los pilotes A y B respectivamente para los diferentes EI. Las deflectadas para cada uno de los casos presentan gran similitud a las deflectadas presentadas en la sección anterior para este mismo tipo de suelo. Entre ambas figuras se puede notar que el pilote A, por ser el que tiene mayor EI inicial, es el que presenta mayor profundidad del punto de pivote para cada uno de los distintos EI. En ambos casos (pilote A y B) el pilote más flexible (0.1EI) presenta una menor profundidad de la cuña pasiva, y ésta va aumentando según aumenta el EI del pilote. En este suelo de arena suelta, la diferencia entre la cantidad de suelo movilizado entre los tres pilotes parece ser significativa.

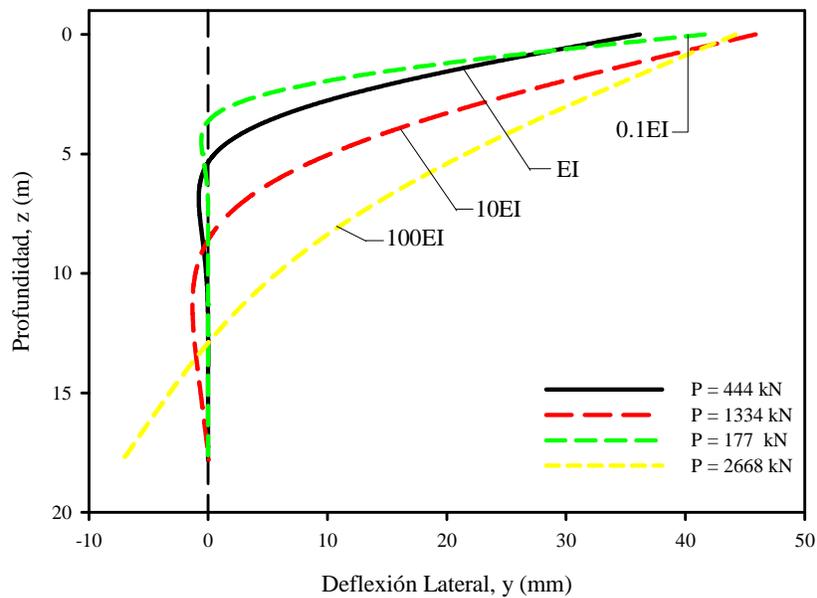


Figura 3-8. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena suelta.

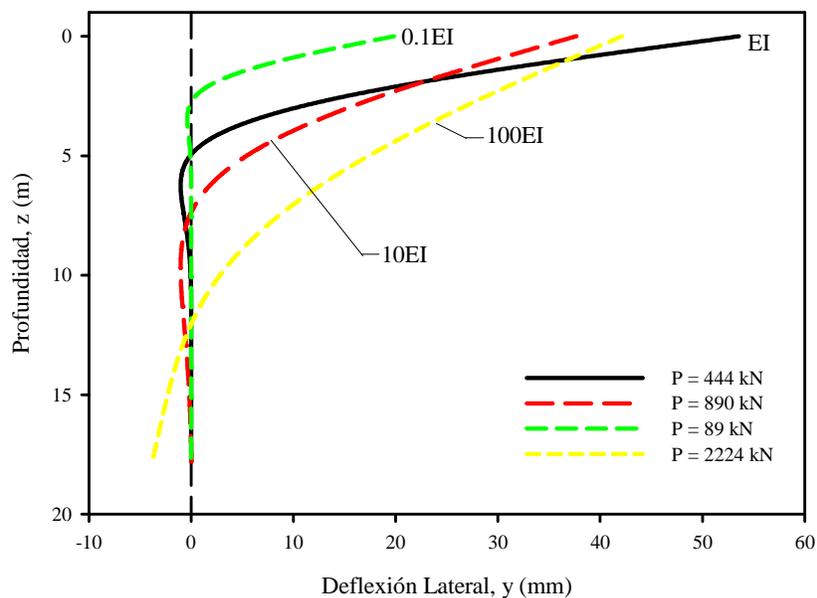


Figura 3-9. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena suelta.

Las curvas p-y para los pilotes A y B son presentadas en las Figura 3-10 y 3-11 respectivamente. En este suelo de arena suelta, la variación del EI de ambos pilotes ejerce poca influencia en la forma y la pendiente inicial de las curvas p-y a diferentes profundidades. La forma de las curvas p-y de la Figura 3-11 (pilote B) se ven un poco más afectadas que las de la

Figura 3-10 (pilote A) al variar el EI del pilote. A una profundidad de 3 m prácticamente no hay diferencia entre la forma de las curvas p-y para ambos pilotes. Lo que sí eventualmente va a variar es la reacción última del suelo la cual va aumentando a medida que el EI del pilote aumenta. Esto se debe a que como pilotes más rígidos (mayores EI) tienden a movilizar mayor cantidad de suelo, la resistencia del suelo a que se genere una falla del tipo flujo a través del pilote se va haciendo cada vez mayor.

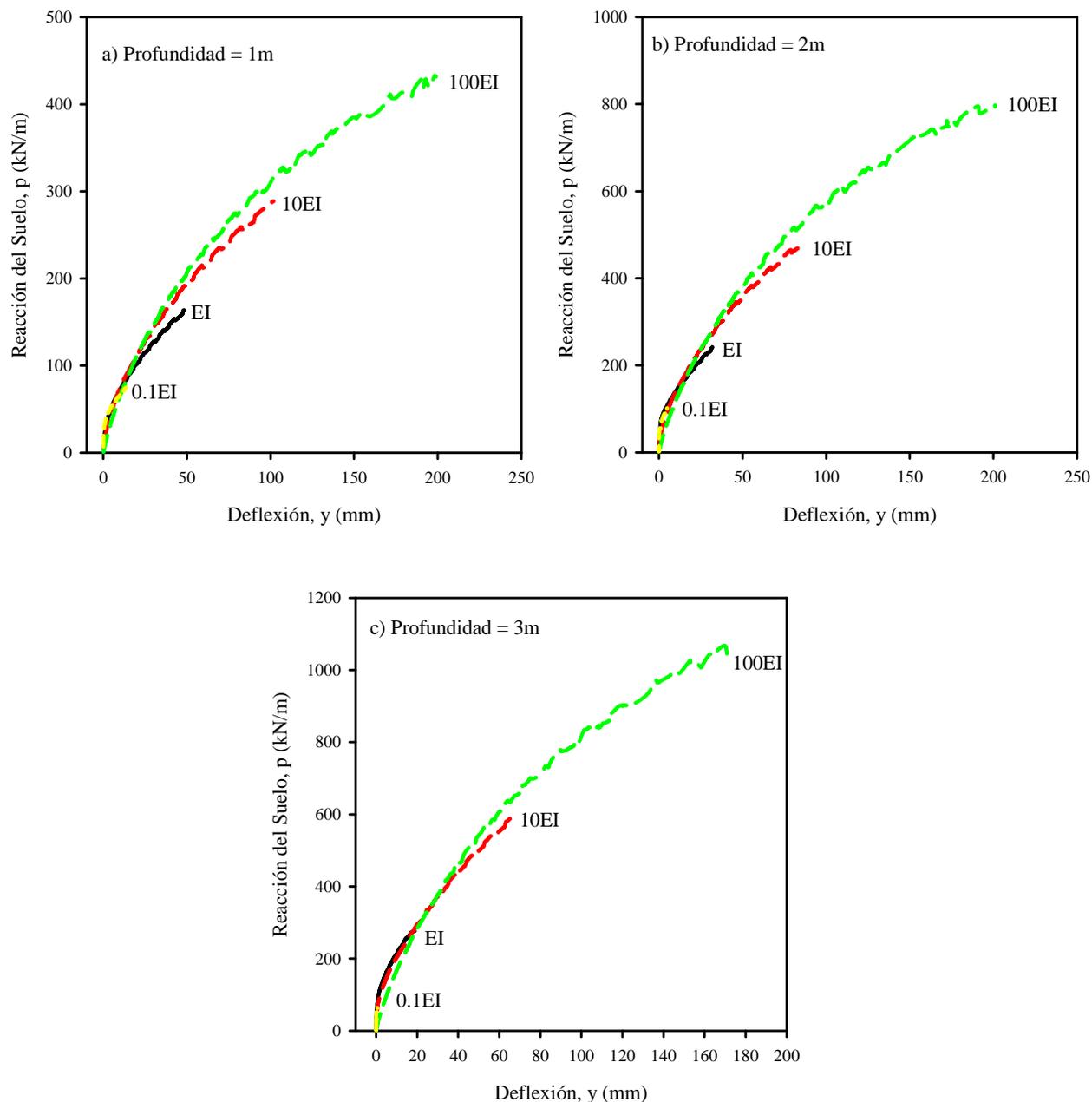


Figura 3-10. Curvas p-y en arenas sueltas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

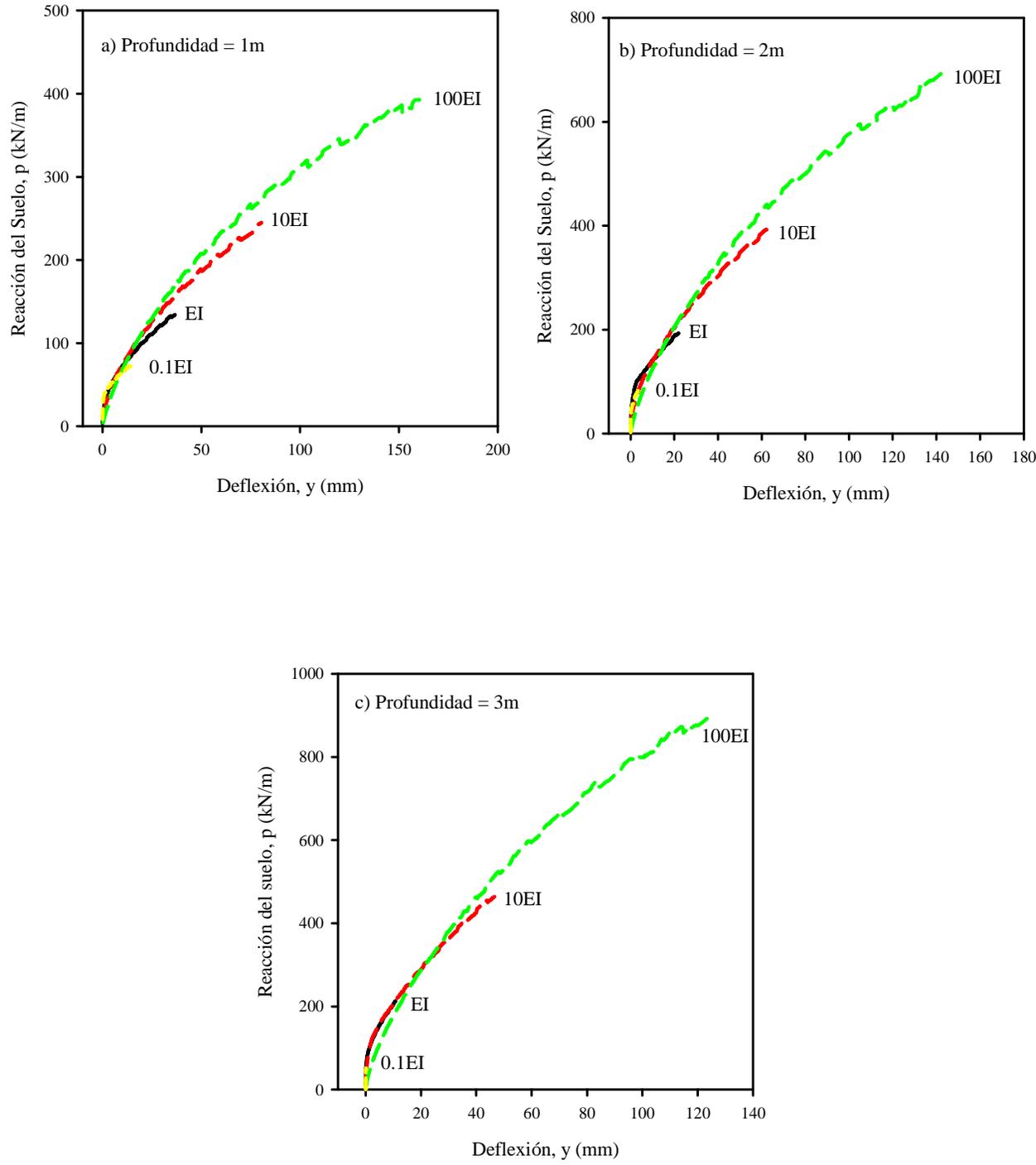


Figura 3-11. Curvas p-y en arenas sueltas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.4.2. Arena medianamente densa

Para este análisis se asumió que era un estrato de arena medianamente densa, limpia y sin presencia del nivel freático. La Tabla 3-5 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes con EI variable donde se asumió que la inercia del pilote permanecía constante y lo único que variaba era el módulo de elasticidad del material. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-5. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena medianamente densa.

	EI Inicial (kN-m ²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
Pilote A	3.6E5 (EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	3.6E4 (0.1EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	3.6E6 (10EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	3.6 E7 (100EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
Pilote B	1.8E5 (EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	1.8E4 (0.1EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	1.8E6 (10EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto
	1.8E7 (100EI)	1.22	18	20	18.4	35	Por defecto

Las Figuras 3-12 y 3-13 muestran las formas deflectadas de los pilotes A y B respectivamente para los diferentes EI. Las deflectadas para cada uno de los casos presentan gran similitud a las deflectadas presentadas en la sección anterior para este mismo tipo de suelo.

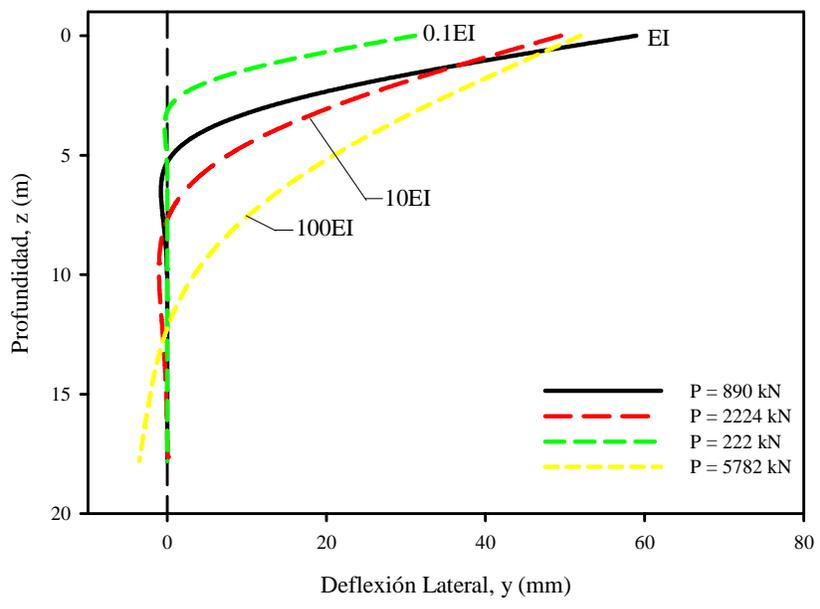


Figura 3-12. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.

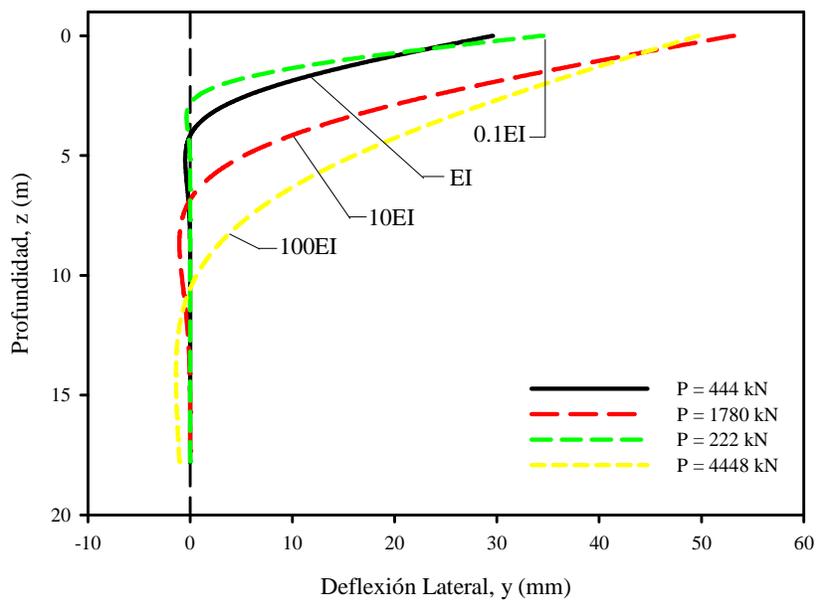


Figura 3-13. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena medianamente densa.

Las curvas p-y generadas con SWM para los pilotes A y B son mostradas en las Figuras 3-14 y 3-15 respectivamente. Las pendientes iniciales de estas curvas p-y a diferentes profundidades son básicamente las mismas, sin embargo, se empieza notar un cambio en la forma de las curvas p-y para los diferentes EI. Éste cambio es un poco más prominente en el caso del pilote B donde la curva p-y se va volviendo asíntota al eje de las abscisas bajo aproximadamente la misma cantidad de deflexión que las curvas p-y para el pilote A pero a menor reacción del suelo. Para ambos casos (pilote A y B) al aumentar o disminuir el EI del pilote, la reacción del suelo a la misma cantidad de deflexión se ve influenciada por estos cambios en rigideces. Según estas curvas p-y, este efecto va disminuyendo con la profundidad. Al igual que las curvas p-y en arena suelta, la reacción última del suelo y la cantidad de deflexión necesaria para alcanzar la misma se ven grandemente influenciada por cambios en rigideces en el pilote.

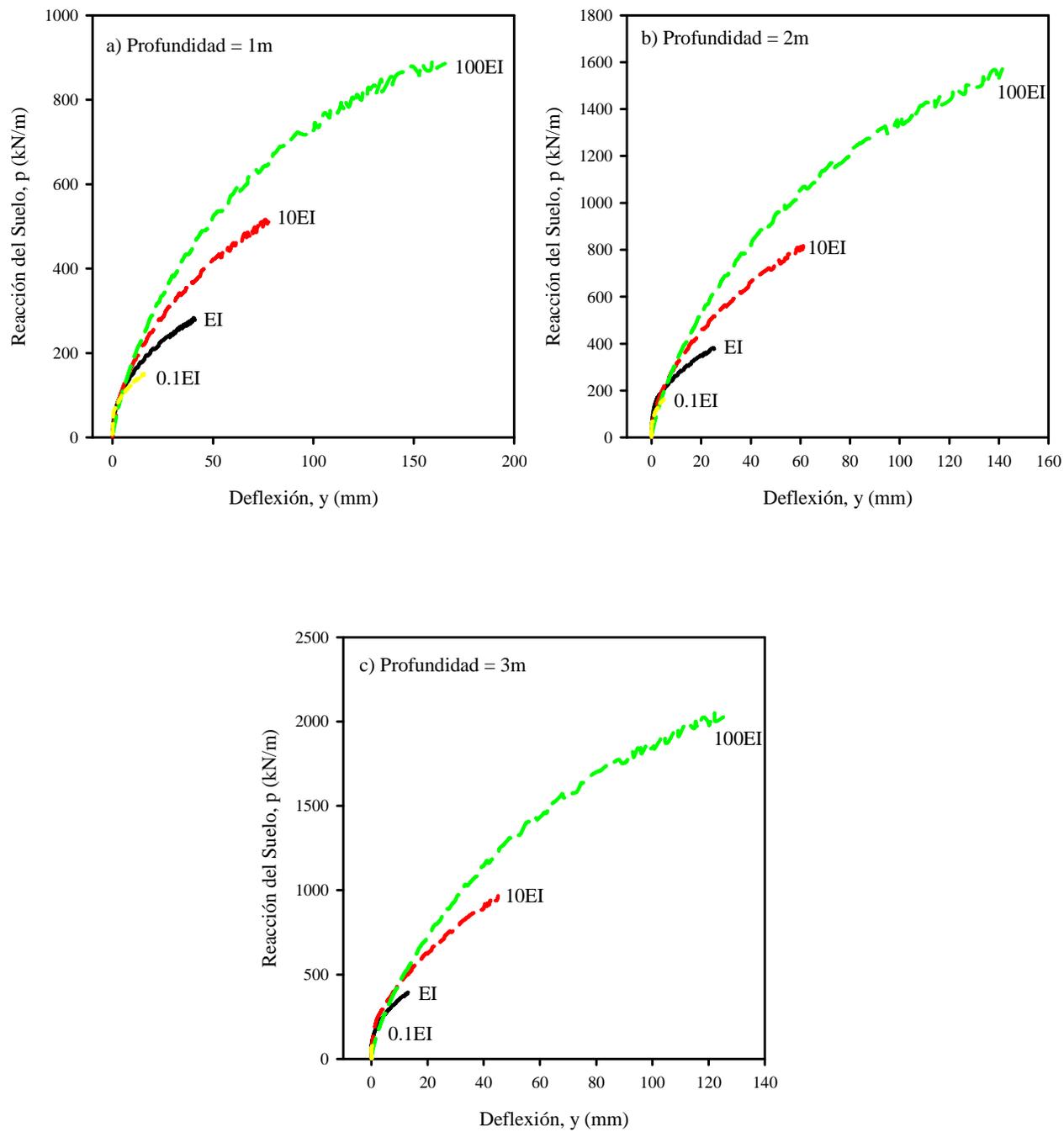


Figura 3-14. Curvas p - y en arenas medianamente densas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

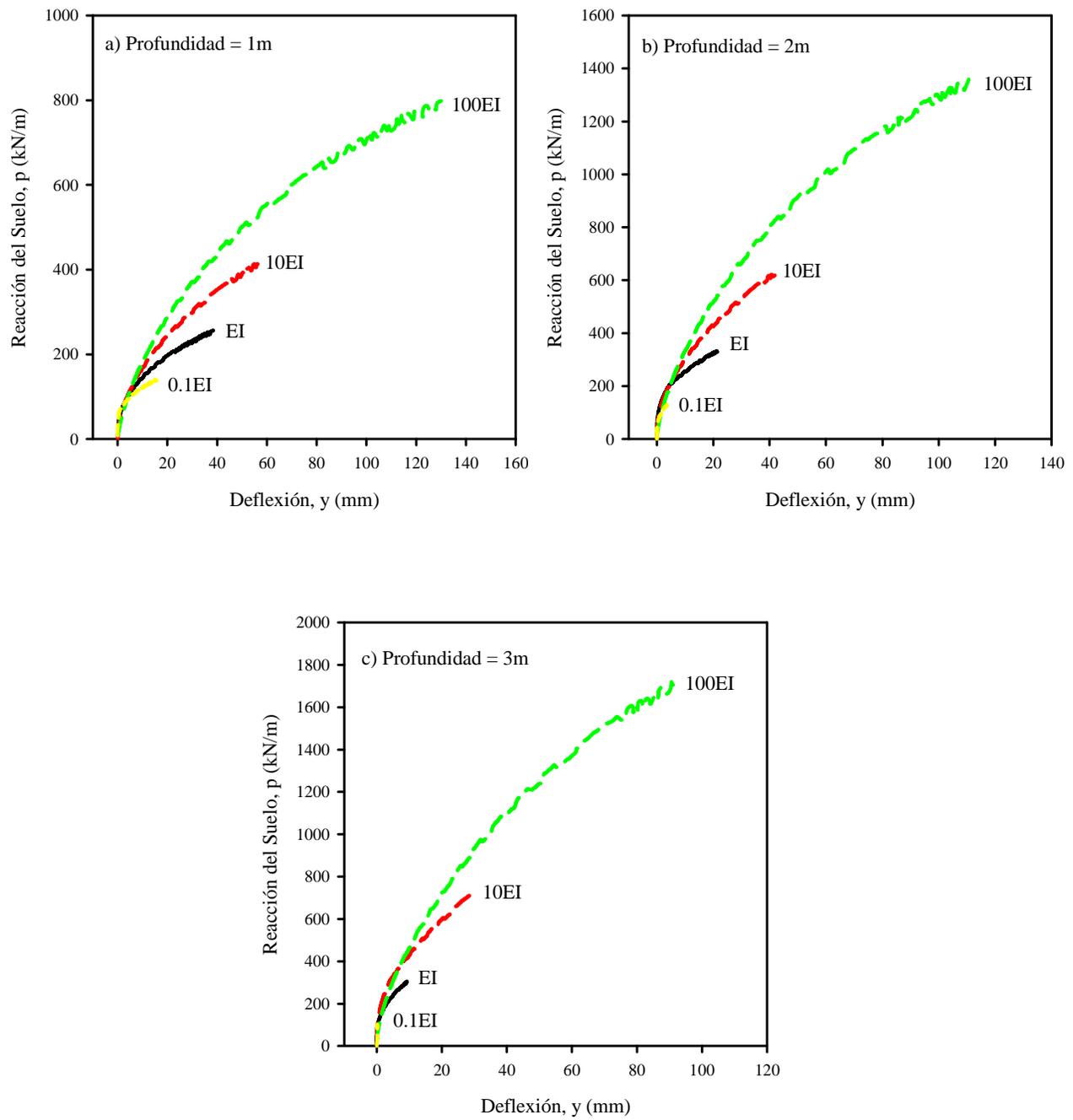


Figura 3-15. Curvas p - y en arenas medianamente densas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.4.3. Arena densa

Para este análisis se asumió que era un estrato de arena densa, limpia y sin presencia del nivel freático. La Tabla 3-6 presenta las propiedades del suelo y del pilote necesarios para analizar los diferentes casos con SWM. Los pilotes utilizados en el análisis son pilotes con EI variable donde se asumió que la inercia del pilote permanecía constante y lo único que variaba era el módulo de elasticidad del material. Se asumió que la cabeza del pilote y el punto de aplicación de la carga estaban al nivel de la superficie del terreno.

Tabla 3-6. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el SWM 6.1 necesarios para analizar los pilotes con EI no lineales en arena densa.

	EI Inicial (kN-m ²)	Diámetro (m)	Long. (m)	Esp. Estrato (m)	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grad.)	ϵ_{50}
Pilote A	3.6E5 (EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	3.6E4 (0.1EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	3.6E6 (10EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	3.6 E7 (100EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
Pilote B	1.8E5 (EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	1.8E4 (0.1EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	1.8E6 (10EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto
	1.8E7 (100EI)	1.22	18	20	20.4	40	Por defecto

Las Figuras 3-16 y 3-17 muestran las formas deflectadas de los pilotes A y B respectivamente para los diferentes EI. Las deflectadas para cada uno de los casos presentan gran similitud a las deflectadas presentadas en la sección anterior para este mismo tipo de suelo.

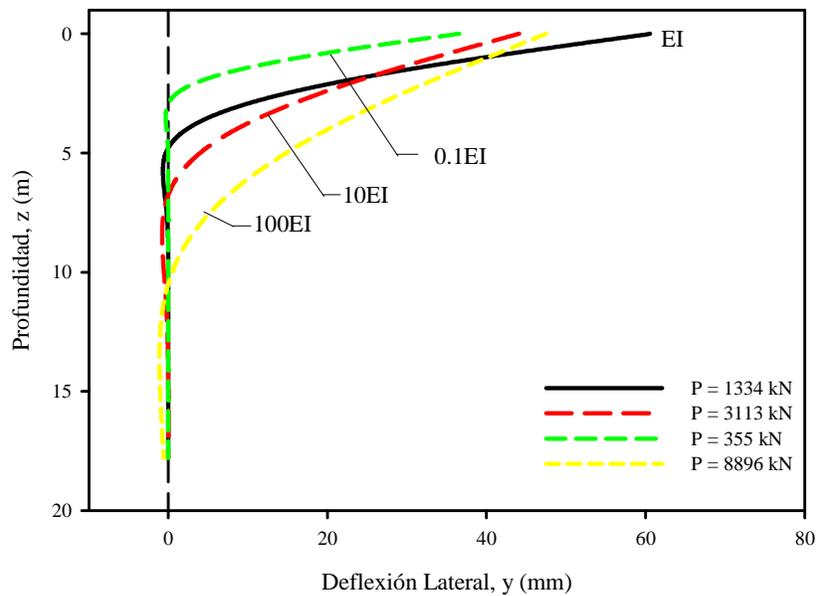


Figura 3-16. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo A bajo una determinada carga lateral en arena densa.

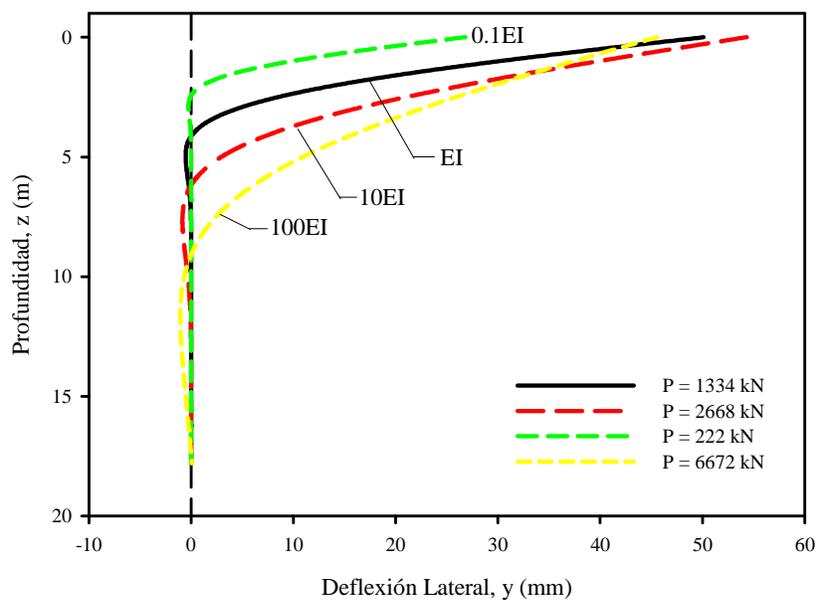


Figura 3-17. Perfil de deflexiones para los diferentes EI del pilote tipo B bajo una determinada carga lateral en arena densa.

Las curvas p-y generadas con SWM para los pilotes A y B son mostradas en las Figuras 3-18 y 3-19 respectivamente. Para arenas densas la influencia que tiene la variación del EI sobre las curvas p-y es más prominente que para arenas sueltas y medianamente densas. De igual forma, las reacciones del suelo a la misma cantidad de deflexión lateral va aumentando según aumenta el EI del pilote, por ejemplo si comparamos las reacciones del suelo de las curvas p-y de la Figura 3-18a para los pilotes con rigideces de EI y 100EI a una deflexión de aproximadamente 40 mm notamos que hay una diferencia de aproximadamente 400 kN/m. Esta diferencia tan significativa puede afectar grandemente las predicciones de deflexiones si los pilotes son analizados utilizando el método convencional de las curvas p-y. En éste caso, al igual que los otros anteriores, las reacciones últimas del suelo siguen el mismo patrón antes mencionado para los suelos de arena suelta y medianamente densa.

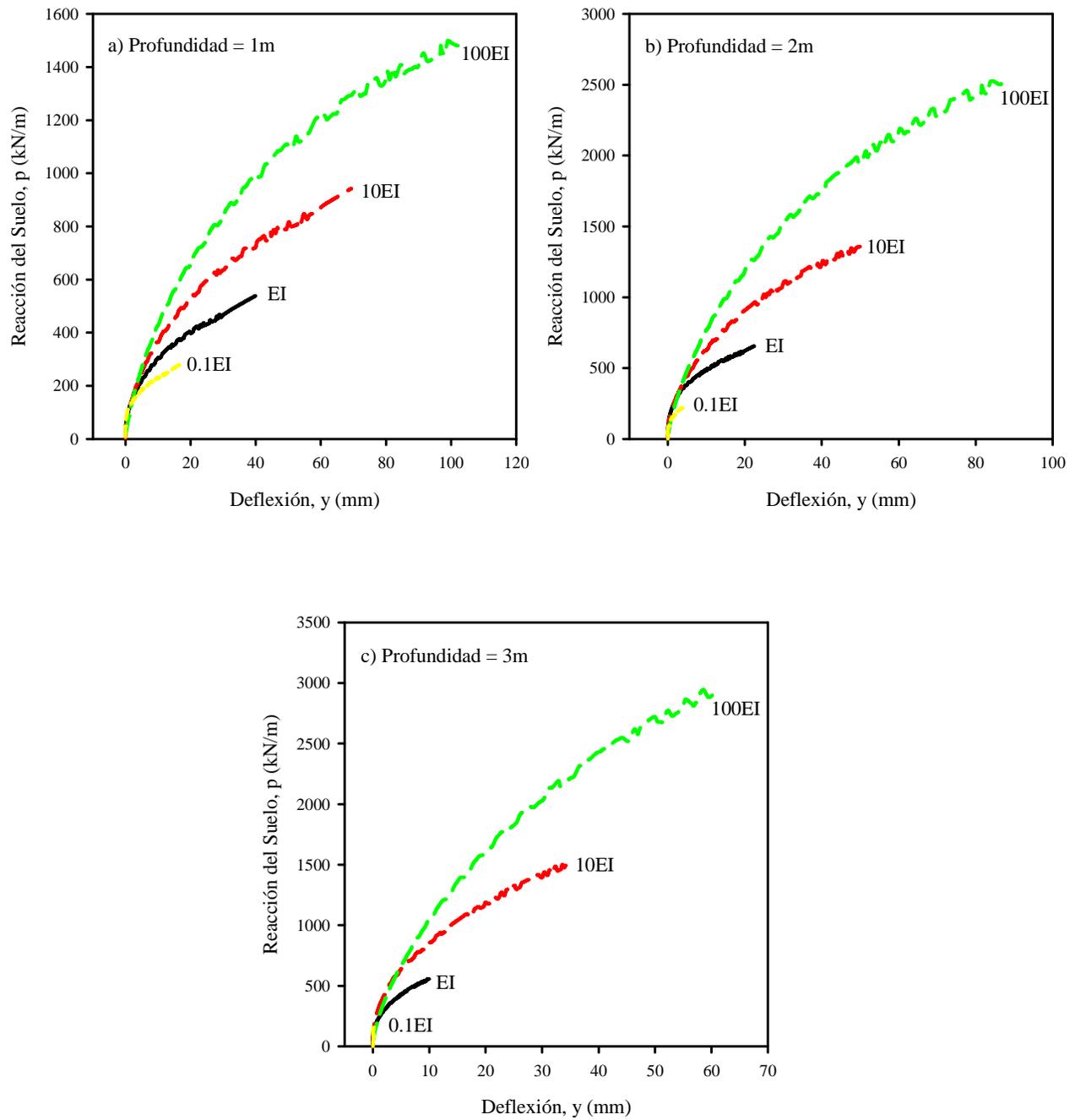


Figura 3-18. Curvas p - y en arenas densas para los diferentes EI del pilote tipo A a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

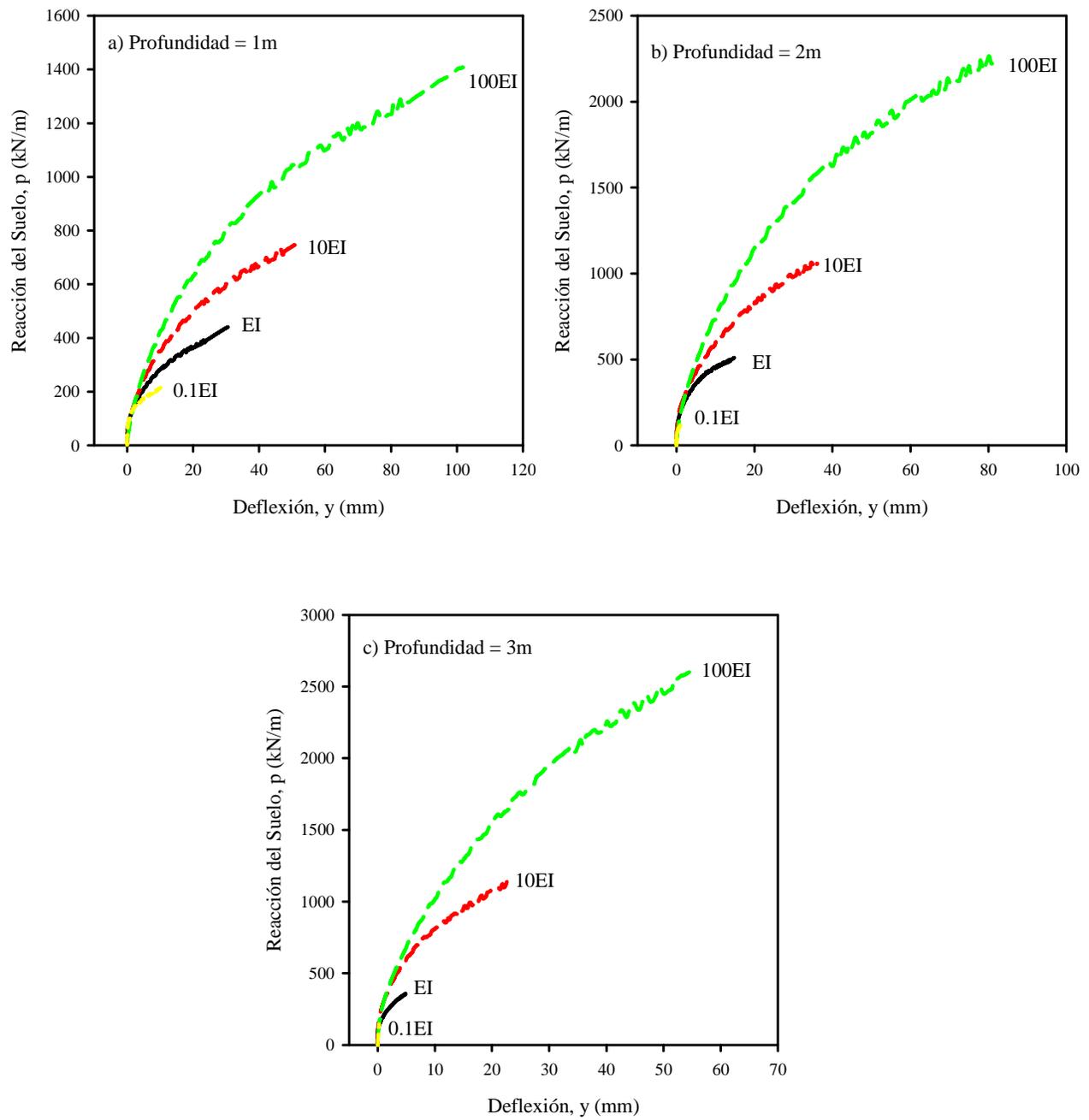


Figura 3-19. Curvas p-y en arenas densas para los diferentes EI del pilote tipo B a distintas profundidades determinadas con SWM 6.1.

3.5. Resumen y conclusiones

En este capítulo se determinó la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre la reacción del suelo utilizando la relación de la deflexión lateral del pilote con las reacción del suelo también conocida como curvas p-y. Se analizaron casos hipotéticos de pilotes flexibles, semi rígidos y rígidos utilizando ambos tipos de modelación del material (EI lineal y no lineal), a los cuales se les determinaron las curvas p-y teóricas para los casos de pilotes embebidos en arena suelta, medianamente densa y densa. La determinación de las curvas p-y se realizó utilizando la versión modificada del programa de computadora SWM 6.1. Se presentaron curvas p-y a 1, 2 y 3 m de profundidad. Para ninguno de los casos las reacciones últimas del suelo pudieron ser determinadas porque, como las curvas p-y determinadas con este programa toman en cuenta el nivel de esfuerzos, primero se llegó a una falla estructural del pilote antes de que se genere la máxima reacción que el suelo puede soportar a la profundidad de interés. Para ambos casos (EI lineal y no lineal) hemos llegado a las siguientes conclusiones de acuerdo al grado de densificación del suelo en el cual los pilotes fueron analizados:

1. La profundidad a la que se extiende la zona afectada del suelo cuando el pilote es cargado lateralmente se ve directamente influenciada por el EI del pilote: éstos exhiben una relación directamente proporcional, a mayor EI mayor es la zona afectada del suelo (cuña pasiva).
2. La pendiente inicial de las curvas p-y también conocida como el módulo horizontal de subrasante casi no se ve afectado con la variación del EI del pilote.
3. Para arenas sueltas, el EI del pilote ejerce poca influencia en la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y con la profundidad.
4. En arenas medianamente densas y densas, el EI del pilote ejerce una gran influencia en la forma de las curvas p-y y las reacciones del suelo con la profundidad. Entre un pilote flexible y uno rígido se llegó a obtener una diferencia de hasta 400 kN/m de la reacción del suelo determinada a la misma cantidad de deflexión lateral.
5. En todos los casos, el EI del pilote ejerce una gran influencia sobre la reacción última del suelo y la cantidad de deflexión lateral necesaria para alcanzar la misma. Esta reacción última del suelo va aumentando según aumenta la rigidez del pilote.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS P-Y DESDE MEDICIONES DE DEFLEXION LATERAL

4.1. Introducción

En el Capítulo 3 se determinó de forma analítica si el EI del pilote era una propiedad sensitiva sobre la reacción del suelo y las curvas p-y. Esto se realizó utilizando el programa SWM 6.1 y determinando las curvas p-y de casos hipotéticos (pilotes hipotéticos y estratos de suelo uniforme) a diferentes profundidades. Aparte de esto, es de nuestro interés saber cuál es la influencia del EI sobre la reacción del suelo en el caso de pilotes reales. Para poder evaluar dicha influencia se desea obtener las curvas p-y de 3 pilotes utilizados en las pruebas de carga lateral del caso histórico de Hampton, Virginia donde parte de la instrumentación de los pilotes incluían inclinómetros, utilizados para medir las deflexiones laterales del pilote a travez de toda su longitud (para mas detalles acerca del caso histórico de Hampton, Virginia ver Capítulo 5).

Generalmente, la determinación de las curvas p-y desde los datos de pruebas de carga de pilotes bien instrumentados es un trabajo arduo y consumidor de tiempo. El procedimiento recomendado por Reese y Van Impe (2001) para la determinación de las curvas p-y desde datos experimentales, consiste en determinar la distribución de momentos a lo largo del pilote desde los datos de los sensores medidores de deformación, y aplicarles la segunda derivada para así obtener la reacción del suelo. La deflexión lateral del pilote se determina al integrar dos veces la distribución de momentos con la profundidad. Esta metodología se ha utilizado bastante y ha probado ser muy efectiva (Matlock y Ripperger 1958, Matlock 1970, Reese et al. 1975). Utilizando la Ecuación 4.1 se puede calcular el momento desde los datos de curvatura del pilote.

$$M = EI\psi \quad (2.1)$$

donde:

EI = rigidez a la flexión del pilote;

ψ = curvatura del pilote.

El único problema de determinar las curvas p-y utilizando este procedimiento, es que, para obtener una buena distribución de momentos, se debe tener un pilote bien instrumentado, con suficientes pares de sensores medidores de deformación, para así poder tener suficientes puntos y obtener una curva bien definida de la distribución de momentos. Una buena distribución de los pares de sensores de deformación se muestra en la Figura 4-1. En esta figura se observa que en los primeros tres metros del pilote se presenta un espaciamiento más cercano de los sensores, esto es para poder capturar los cambios en pendientes que se generan en la zona donde se producen los momentos más significativos. Al salir de la zona de la cuña, los sensores de medición de deformación pueden ser espaciados a una mayor longitud porque debajo de la cuña, los momentos que se generan son muy poco significativos para el análisis.

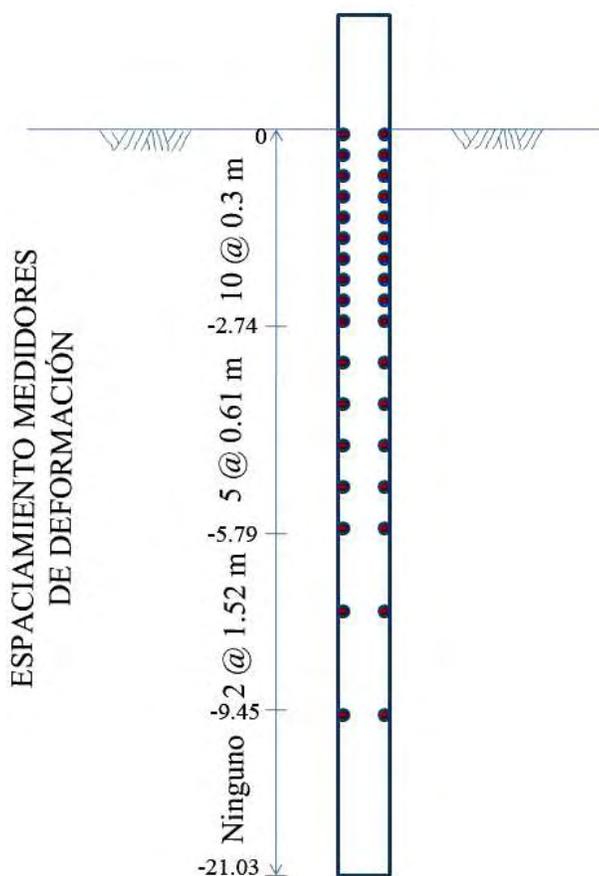


Figura 4-1. Esquema de la distribución de los sensores medidores de deformación utilizado en el pilote de prueba de la isla Mustang (adaptado de Reese y Van Impe 2001).

En vista de que la instrumentación de los pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia inicialmente no fue diseñada para obtener curvas p-y, sino más bien para obtener el perfil de deflexiones a lo largo del pilote. El tipo de instrumentación utilizado en las pruebas de carga de los 3 pilotes se describirá en el capítulo 5. Por esta razón se decidió utilizar otro procedimiento para obtener dicha distribución de momentos y posteriormente las curvas p-y.

A continuación se describirá detalladamente el procedimiento utilizado para determinar las curvas p-y para los pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia.

4.2. Descripción de la metodología propuesta para determinar curvas p-y desde datos de inclinómetros

Para determinar las reacciones del suelo-pilote desde los datos de deflexión obtenidos desde inclinómetros, primero, se debe determinar con buena exactitud la distribución de momentos a lo largo del pilote. Ooi y Ramsey (2003) demostraron que aplicar un algoritmo de ajuste de curva polinómico cúbico del tipo “*piecewise*” a ventanas de 5 puntos consecutivos es una forma efectiva de determinar la distribución de curvatura y momentos a lo largo del pilote. Por otro lado, para determinar la distribución de reacciones del suelo-pilote hemos encontrado que el método de mínimos cuadrados o “*least squares*” en inglés, es un algoritmo adecuado para este propósito. En las próximas secciones se describirán los principios básicos de ambos algoritmos de ajuste de curva polinómicos así como una descripción de los pasos, tanto para determinar la distribución de momentos a lo largo del pilote como para determinar las reacciones del suelo a cualquier profundidad de interés.

4.2.1. Algoritmo de ajuste de curva polinómico cúbico del tipo “*Piecewise*”

Los polinomios cúbicos del tipo “*piecewise*” son sistemas de ecuaciones polinómicas cúbicas que son ajustados a grupos de puntos de control consecutivos. Una función polinómica cúbica del tipo “*piecewise*” es ajustada entre dos puntos adyacentes, dando así una transición continua y suave que modela bastante bien los puntos de inflexión de una curva determinada.

Estas curvas cúbicas pueden ser ajustadas de una manera muy exacta a ventanas de 4 puntos consecutivos, si éste fuera el caso, cuatro polinomios de la forma $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$ serían ajustados, y un sistema de ecuaciones de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas sería creado. Las constantes de cada una de las ventanas pueden ser determinadas con el uso de hojas de cálculo o simples algoritmos computacionales. Una característica muy particular de los polinomios cúbicos del tipo “*piecewise*” es que la primera y segunda derivada de cada función ajustada es cero en los puntos finales, lo que resulta en un ajuste de curva continuo y suave a todo lo largo de la longitud del pilote.

4.2.2. Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados o “*least squares*” en inglés, es un procedimiento matemático utilizado para determinar el mejor ajuste de curva para un determinado grupo de puntos. El propósito principal del método de mínimos cuadrados es determinar el valor correcto de las constantes de la curva polinómica ajustada, que proporcione la mínima sumatoria de los errores al cuadrado entre el conjunto de puntos proporcionado y el conjunto de puntos ajustado. En nuestro caso, un polinomio cúbico de la forma $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$ es ajustado usando esta metodología. La sumatoria de los errores al cuadrado entre la estimada respuesta y la actual se presenta con de la siguiente forma:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (D + Cx_i + Bx_i^2 + Ax_i^3)]^2 \quad (2.2)$$

donde:

R^2 = sumatoria de los errores al cuadrado;
 y = coordenada proporcionada en el eje de las ordenadas;
 x = coordenada proporcionada en el eje de las abscisas;
 A, B, C y D son constantes.

Aplicando derivadas parciales de R^2 con respecto a cada una de las constantes e igualándolas a cero, se puede obtener el siguiente sistema de ecuaciones para minimizar el error asociado a los valores de las constantes A, B, C y D:

$$\begin{aligned}
 \sum y &= nD + C \sum x + B \sum x^2 + A \sum x^3 \\
 \sum xy &= D \sum x + C \sum x^2 + B \sum x^3 + A \sum x^4 \\
 \sum x^2y &= D \sum x^2 + C \sum x^3 + B \sum x^4 + A \sum x^5 \\
 \sum x^2y &= D \sum x^3 + C \sum x^4 + B \sum x^5 + A \sum x^6
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Después de obtener el sistema de ecuaciones simultáneas (Ecuación 4.3), los valores de las constantes pueden ser determinados por cualquier método usado para resolver sistemas de ecuaciones simultáneas. Las ventajas asociadas a esta metodología son las siguientes:

1. Muy fácil de programar.
2. Se obtienen ajustes de curva bastante acertados del conjunto de puntos proporcionados.
3. Las ecuaciones polinómicas ajustadas son derivables.

4.2.3. Determinación de momentos

Como vimos, con la Ecuación. 4.1 podemos calcular el momento conociendo el EI del pilote y la curvatura asociada. Para determinar la distribución de la curvatura a lo largo del pilote utilizaremos una modificación a la metodología propuesta por Ooi y Ramsey (2003) para determinar la distribución de la curvatura a lo largo del pilote desde los datos de inclinómetro. Ooi y Ramsey proponen que se tomen ventanas de 5 puntos, y que a cada ventana se le ajuste un polinomio cubico del tipo “*piecewise*” de forma $y = Az^3 + Bz^2 + Cz + D$ donde A, B, C y D son constantes. La curvatura a cierta profundidad z se determina al obtener la segunda derivada a la ecuación polinómica cubica ajustada y puede ser calculada utilizando la siguiente Ecuación:

$$\psi = \frac{d^2y}{dz^2} = 6Az + 2B \tag{2.4}$$

Para poder obtener una distribución de la curvatura del pilote más precisa, y una forma de la curva con transiciones entre punto y punto más suaves, se decidió aplicar ciertas modificaciones al método antes descrito. Este es el conjunto de pasos que se tomaron para determinar la distribución de la curvatura a lo largo del pilote (Figura 4-2):

1. Aplicar una función de interpolación a la curva de deformación del pilote y crear puntos artificiales interpolando entre los puntos reales obtenidos con el inclinómetro;
2. Ajustar un polinomio cubico a ventanas de 5 puntos de datos de deformación;
3. Derivar el polinomio dos veces para determinar una distribución lineal de curvatura;
4. Obtener el primer estimado de la curvatura al evaluar la función lineal en el centro de cada ventana;
5. Correr un nodo hacia abajo y repetir los pasos 2 al 4;
6. Correr dos nodos hacia abajo y repetir los pasos 2 al 4;
7. Obtener el valor final de curvatura al promediar los tres valores de las tres funciones lineales evaluadas al centro de cada ventana y asignar ese valor de curvatura a la profundidad a la que se encuentra el nodo central del paso 5;
8. Ajustar un polinomio de grado 5 ó mayor (ajuste de curva global) al diagrama de curvatura.

Los pasos del 2 al 7 son los utilizados por Gerber (2003) para determinar la presión del suelo desde la distribución de momentos del pilote. Este procedimiento (pasos del 2 al 7) es parecido al método del gradiente plano utilizado por programas de interpolación de datos por computador.

Al obtener un diagrama de curvatura aceptable, se puede calcular el momento asociado interpolando desde la curva que relaciona el momento con la curvatura del pilote. De esta forma se puede determinar los momentos para pilotes compuestos por materiales que se comportan en el rango lineal o no lineal incorporando así cambios en la de rigidez a la flexión del pilote en el análisis.

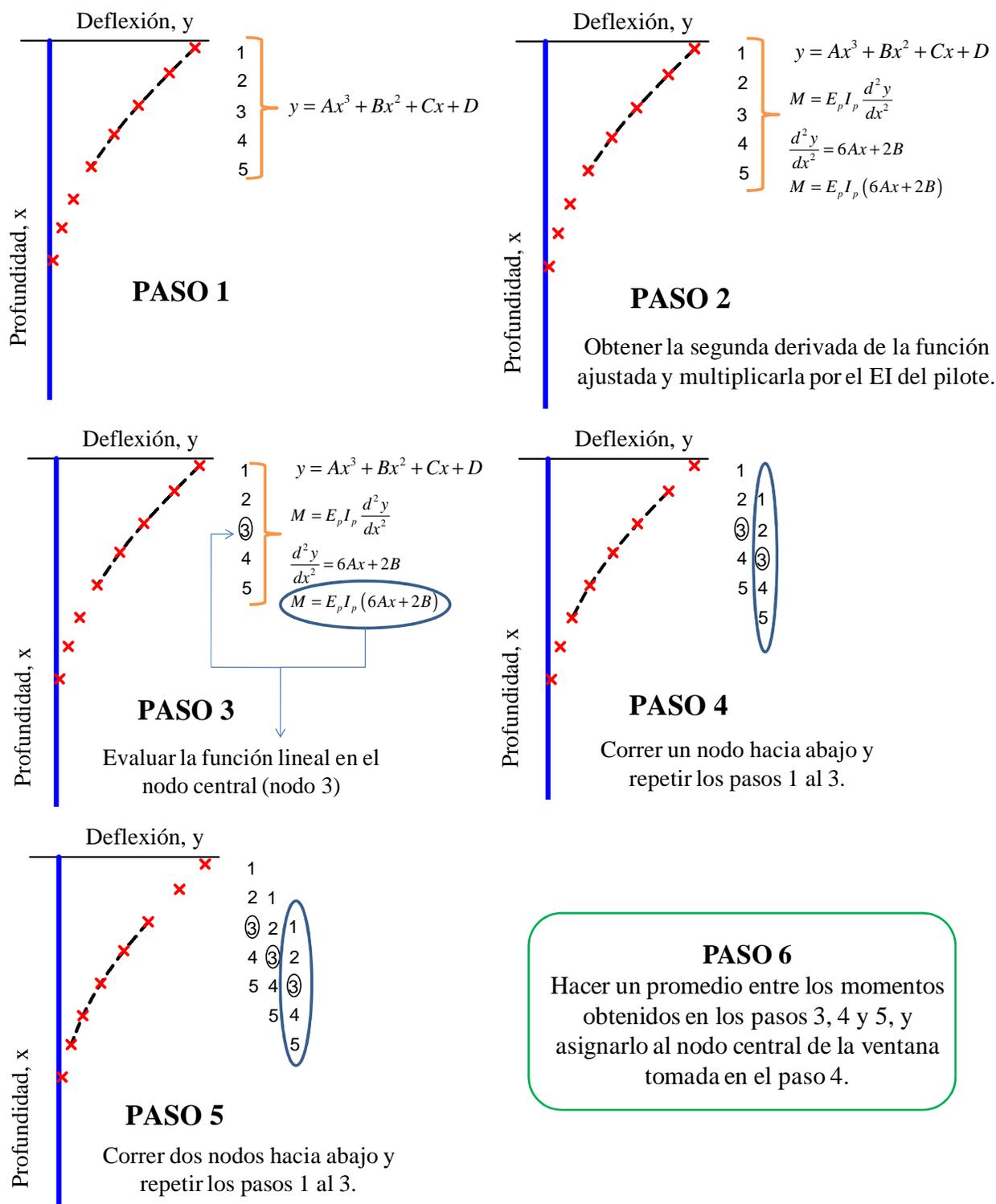


Figura 4-2. Procedimiento paso por paso para determinar momentos desde datos de deflexión lateral provenientes de mediciones de inclinómetro.

En la sección 4.3 se describirá el proceso completo utilizado para calibrar la metodología descrita en esta sección para calcular la distribución de momentos desde los datos de inclinómetros.

4.2.4. Determinación de la reacción del suelo

A diferencia de la distribución de momentos a lo largo del pilote, la cual se puede obtener con buena exactitud desde los datos de inclinómetro, el diagrama de reacción del suelo es mucho más difícil de obtener. Para obtener la reacción del suelo se debe derivar dos veces el momento, y en este proceso, pequeños errores en la medición del momento se pueden amplificar a raíz de la doble derivación. Un ejemplo de esto fue demostrado por Matlock y Ripperger (1958). Matlock y Ripperger demostraron con un ejemplo hipotético como un error de 1% en la medición del momento en un punto determinado puede generar un error de un 140% en la reacción del suelo asociada a ese punto en particular. Este error puede ser minimizado al suavizar la curva de momento a menos de 20%. Esta es una de las razones por la que se utilizó el ajuste de curva global antes mencionado en la sección 4.2.3

Para determinar la reacción del suelo a lo largo del pilote, se utilizó el mismo procedimiento descrito en la sección 4.2.3 utilizado para determinar la distribución de momentos (pasos del 2 al 7), pero en lugar de utilizar un ajuste de curva polinómico cubico del tipo “*piecewise*”, se utilizó un ajuste de curva polinómico cubico por el método de mínimos cuadrados.

Se debe ser muy cuidadoso al aplicar este método para obtener la reacción del suelo desde los datos de inclinómetro. De ser necesario, ciertas modificaciones se le deben aplicar a la distribución de momentos para así poder obtener una mejor aproximación de las reacciones del suelo. Siempre es recomendable tener unos cuantos sensores medidores de deformación distribuidos a lo largo del pilote, para así poder proporcionar algunos puntos de control para la distribución de momentos sirvan para validar dicha distribución.

En la siguiente sección, se explicará el proceso detallado de calibración de esta metodología utilizando el programa LPILE 5.0.

4.3. Calibración del método

En las secciones 4.2 se explicó todo lo relacionado a la metodología utilizada para obtener los momentos y las reacciones del suelo utilizando los datos de deflexión obtenidos con el uso de inclinómetros. En esta sección se explicará el proceso de calibración del método. El proceso de calibración de la metodología propuesta consistió en utilizar los datos de deflexión de 2 pilotes (uno que se comporta en el rango lineal-elástico y otro en el rango no lineal) obtenidos utilizando LPILE. Los dos pilotes fueron analizados en dos tipos de arenas diferentes para así captar que tan bien puede detectar las diferencias en las diferentes curvas p-y. Las próximas secciones presentan los detalles de la calibración del método para los dos pilotes embebidos en los dos tipos de arenas diferentes.

4.3.1. Pilote en el rango lineal-elástico

Para calibrar la metodología antes descrita, se utilizaron dos pilotes hipotéticos del mismo diámetro, asumiendo un comportamiento lineal de la relación momento-curvatura de los pilotes (EI constante) y un estrato de suelo uniforme. La Tabla 4-1 muestra las propiedades utilizadas en el modelado estos dos casos hipotéticos con LPILE 5.0.

Tabla 4-1. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el análisis con LPILE de los pilotes con EI constante.

	Caso A	Caso B
Sección	Cuadrada	Cuadrada
Material	Acero	Acero
Diámetro (m)	0.610	0.610
Área (m²)	0.372	0.372
EI (kN-m²)	2,303,951	2,303,951
Peso específico del suelo (kN/m³)	15.7	19.7
Angulo Friccion interna suelo	30	35
k (MPa/m)	6.5	12
Curvas p-y (Arena)	Reese et al. (1974)	Reese et al. (1974)

En el programa LPILE 5.0 se puede utilizar una discretización del pilote de hasta 301 nodos, pero para nuestro propósito solo se utilizó un arreglo de 151 nodos. Si a este tipo de análisis, con esa cantidad de nodos, se le aplica la metodología propuesta, se obtendrán resultados bastante buenos, pero, como en la realidad los datos de inclinómetro no son tan abundantes, se decidió hacer el siguiente ejercicio para poder validar nuestra metodología. Al total de los datos de deflexión que se obtienen con LPILE, que, como mencionamos anteriormente es de 151 puntos, se le sustrajo una cierta cantidad de puntos tal que, la cantidad neta de los datos de deformación sean equivalentes a la que se obtendrían si se utilizara un inclinómetro real.

La Figura 4-3a y 4-3b muestran las deflecciones para los casos A y B respectivamente. Se puede notar que a cargas relativamente bajas causantes de pequeñas deflexiones en el pilote, la forma deflectada del mismo es casi una línea recta, lo cual dificulta el proceso de ajuste de curva polinómica cubica a la misma. Para cargas más significativas, la forma deflectada del pilote presenta una curva más pronunciada lo que facilita el ajuste de curva polinómica cubica.

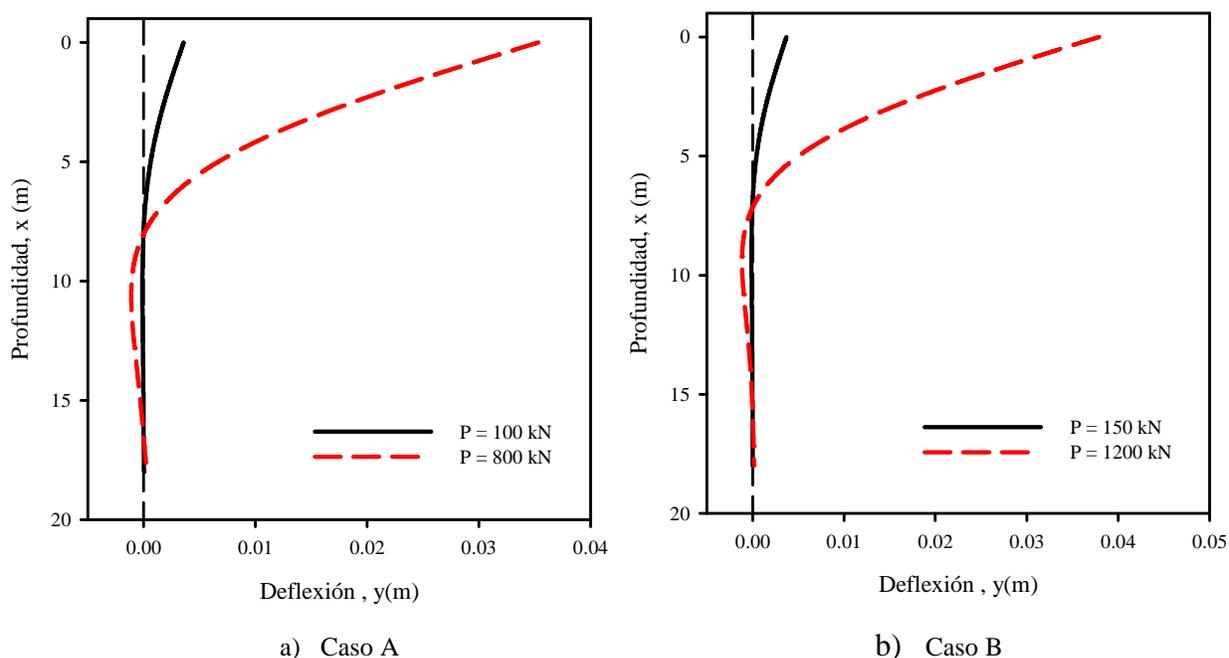


Figura 4-3. Deflectada de los pilotes hipotéticos para diferentes cargas laterales.

La distribución de momentos obtenidos al aplicar la metodología propuesta a las deflectadas mostradas en la Figura 4-3 son mostradas en la Figuras 4-4 y 4-5 tanto como para el caso de baja deformación como para el de alta deformación.

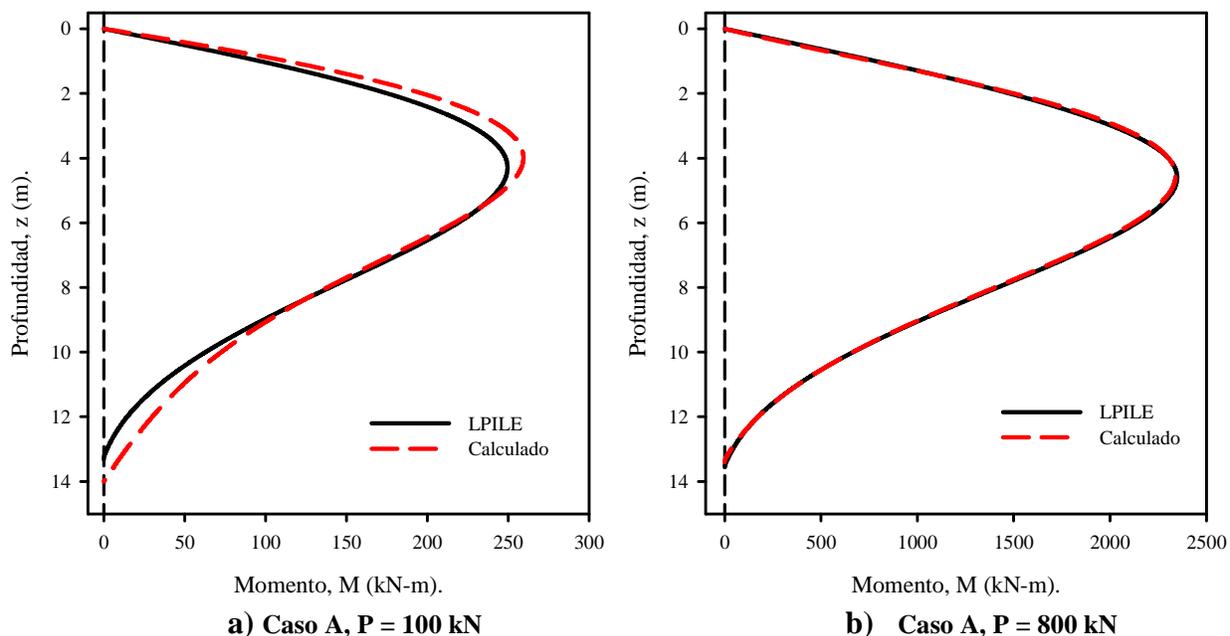


Figura 4-4. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso A para dos diferentes niveles de carga lateral.

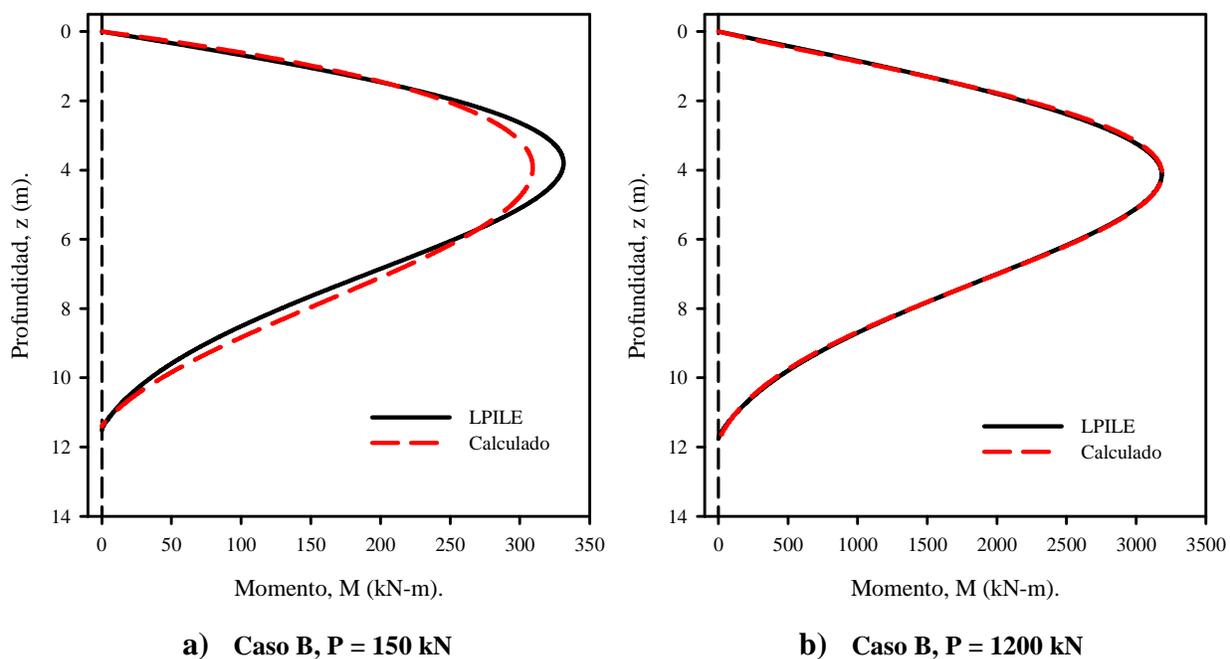


Figura 4-5. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso B para dos diferentes niveles de carga lateral.

Para ambos casos, a niveles de cargas laterales relativamente bajos se aprecia una predicción no tan buena de la distribución de los momentos con la profundidad. Para el Caso A

bajo una carga relativamente baja (Figura 4-4a) se presenta una sobrepredicción del momento máximo y el punto de cero momento. Para el Caso B bajo una carga relativamente baja (Figura 4-4a) se presenta una subpredicción del momento máximo y una buena predicción del punto de cero momento. Por otro lado, en ambos casos se aprecia una excelente predicción de la distribución de momentos al aplicar la metodología propuesta a formas deflectadas del pilote que presenten mayor cantidad de deformación (Figuras 4-4 b y 4-5 b). Como mencionamos anteriormente, la razón por la cual no se presentó una predicción tan acertada en el caso de bajas deformaciones es que, es más difícil ajustar una curva polinómica cubica a una forma deflectada del pilote que presente poca cantidad de deflexión, ya que los puntos de inflexión al no ser tan pronunciados dificulta el proceso de ajuste.

Aunque la predicción de la distribución de momentos desde los datos de inclinómetros presenta ser bastante acertada, la predicción de la distribución de las reacciones del suelo no suele ser tan precisa. Ya que para determinar los momentos se debe calcular la segunda derivada de las deflexiones laterales, y para determinar las reacciones se debe obtener la segunda derivar del momento, en resumidas cuentas se está derivando 4 veces las deflexiones del pilote. Esta práctica incurre en errores bastante grandes y produce diagramas de distribución de las reacciones del suelo sobre el pilote no tan confiables. Principalmente las zonas cercanas a la cabeza, la punta del pilote y la zona cercana al punto de cero deflexión son las más difíciles de estimar, por esto, extremo cuidado se debe tener si se desea calcular las curvas p-y en las zonas antes mencionadas.

Para poder validar este método completamente y asegurar que sea lo bastante funcional para ser utilizado el caso histórico de Hampton, Virginia, se decidió obtener las curvas p-y de los pilotes hipotéticos y compararlos con las curvas p-y de Reese et al. (1974) a diferentes profundidades obtenidos con LPILE. En la Figura 4-6 se comparan las curvas p-y calculadas a 2 y 3 m de profundidad con las curvas p-y obtenidas con LPILE para el Caso A. Para las dos profundidades se apreciar una predicción bastante buena en la zona lineal de la curva p-y. Aplicando el procedimiento descrito en la sección 4.2 no se pudieron obtener valores constantes de p_{ult} , por el contrario, se obtuvieron valores muy por encima del mismo, estos presentaron una tendencia ascendente y no asíntota al eje de las abscisas como lo es el comportamiento de una curva p-y típica de la literatura. Al parecer el método no predice muy bien la distribución de

momentos cuando $p = p_{ult}$. Por esto, si se desea obtener la curva p-y completa, ciertas modificaciones se le deben aplicar a la distribución de momentos.

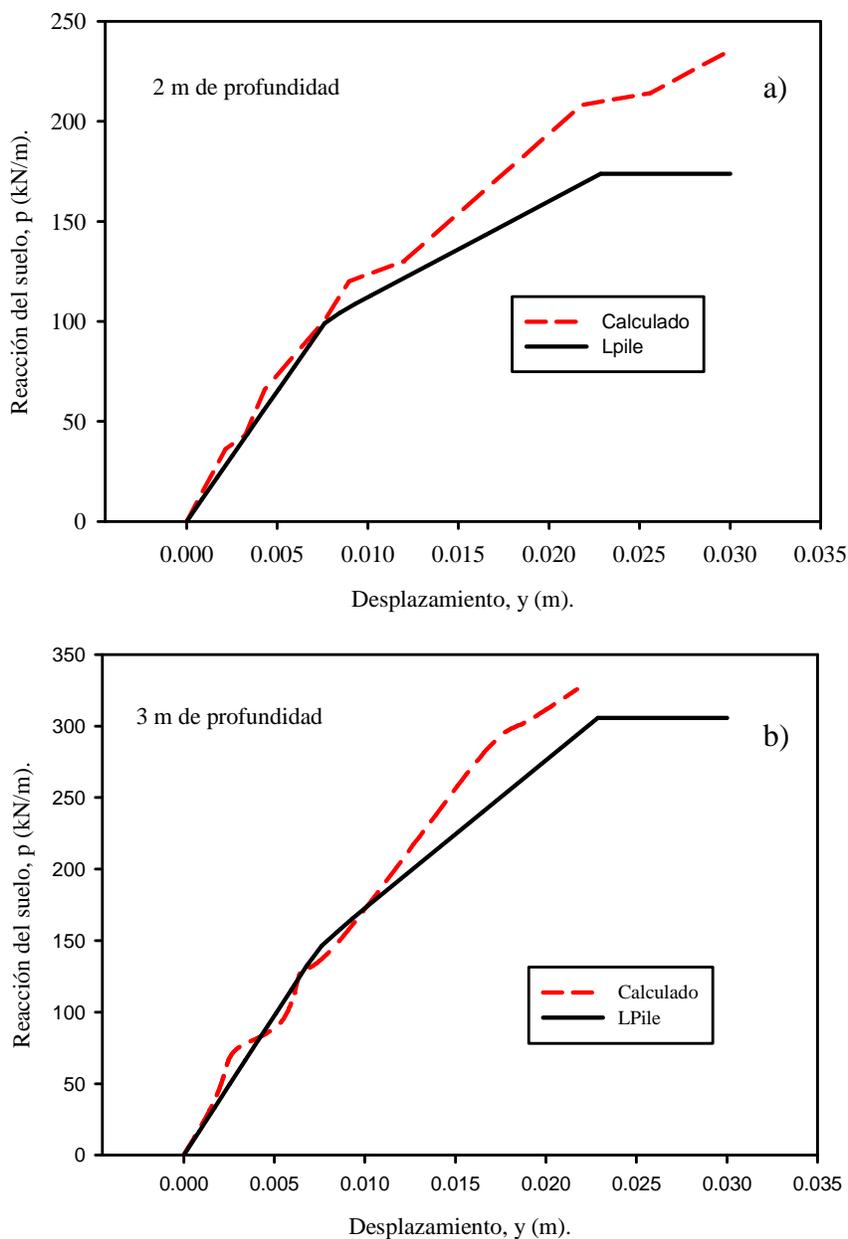


Figura 4-6. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso A.

La comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con LPILE para el Caso B a 2 y 3 m de profundidad se muestran en la Figura 4-7. Al igual que en el pilote A, la pendiente inicial de las curvas p-y calculadas coinciden con la de las curvas p-y desarrolladas por LPILE.

Esto quiere decir que en ambos casos se obtuvieron coeficientes de subrasante bastante cercanos a los inicialmente proporcionados en el análisis con LPILE para los Casos A y B los cuales fueron $K = 6.5 \text{ MPa/m}$ y $K = 12 \text{ MPa/m}$ respectivamente.

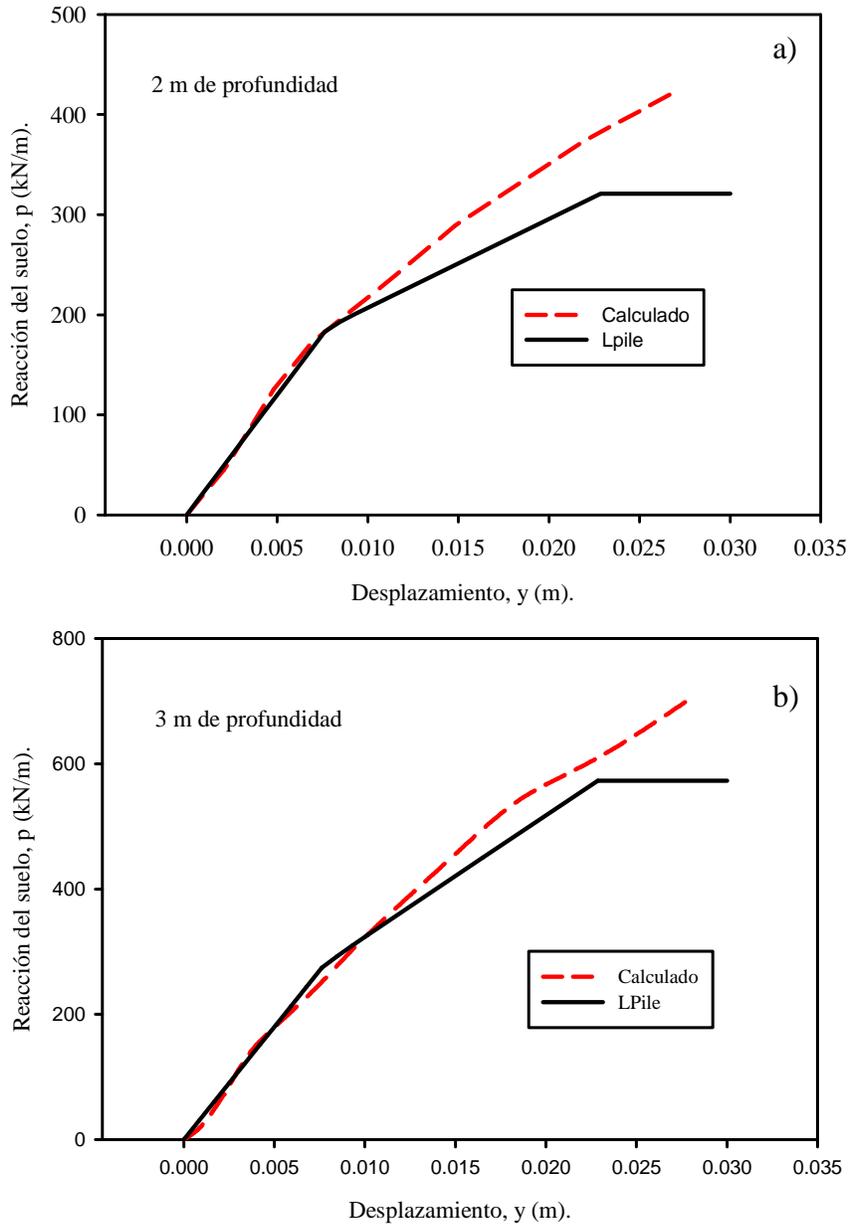


Figura 4-7. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso B.

Teniendo en cuenta que [1] se asumieron pilotes con un comportamiento del material en el rango elástico (EI constante), [2] se utilizó un estrato de suelo uniforme, [3] se modelaron los pilotes con cabeza libre ($M=0$) y [4] se modelaron los pilotes con la carga aplicada en la superficie del terreno, en otras palabras, se asumieron condiciones ideales para modelar los pilotes con LPILE. Se obtuvieron resultados bastante bueno utilizando estas condiciones ideales.

Para poder captar un poco mejor el efecto de un pilote real, se decidió realizar el mismo ejercicio de calibración presentado en esta sección utilizando propiedades del material del pilote en el rango no lineal. Con esto se puede apreciar que tan bien se comporta el método cuando se utiliza para determinar la distribución de momentos con la profundidad y las curvas $p-y$ de pilotes cuyos materiales son modelados no lineales.

En la siguiente sección se presentará la metodología aplicada al a un caso hipotético muy parecido al de esta sección pero ahora utilizando propiedades no lineales del material del pilote.

4.3.2. Pilote en el rango no lineal

Es de sumo interés saber que tan efectivo es el método para determinar las curvas $p-y$ en pilones cuyo material se comporte en el rango no lineal lo cual es el caso de todos los materiales en la realidad. Para esto se utilizaron dos pilotes hipotéticos del mismo diámetro, asumiendo un comportamiento no lineal de la relación momento-curvatura de los pilotes (EI variable) mostrado en la Figura 4-8 y un estrato de suelo uniforme. Estas relaciones no lineales del material fueron calculadas utilizando el modelo de Mander para determinar la relación del momento-curvatura del hormigón no confinado incorporado en LPILE. La Tabla 4-2 muestra las propiedades utilizadas en el modelado estos dos casos hipotéticos con LPILE 5.0.

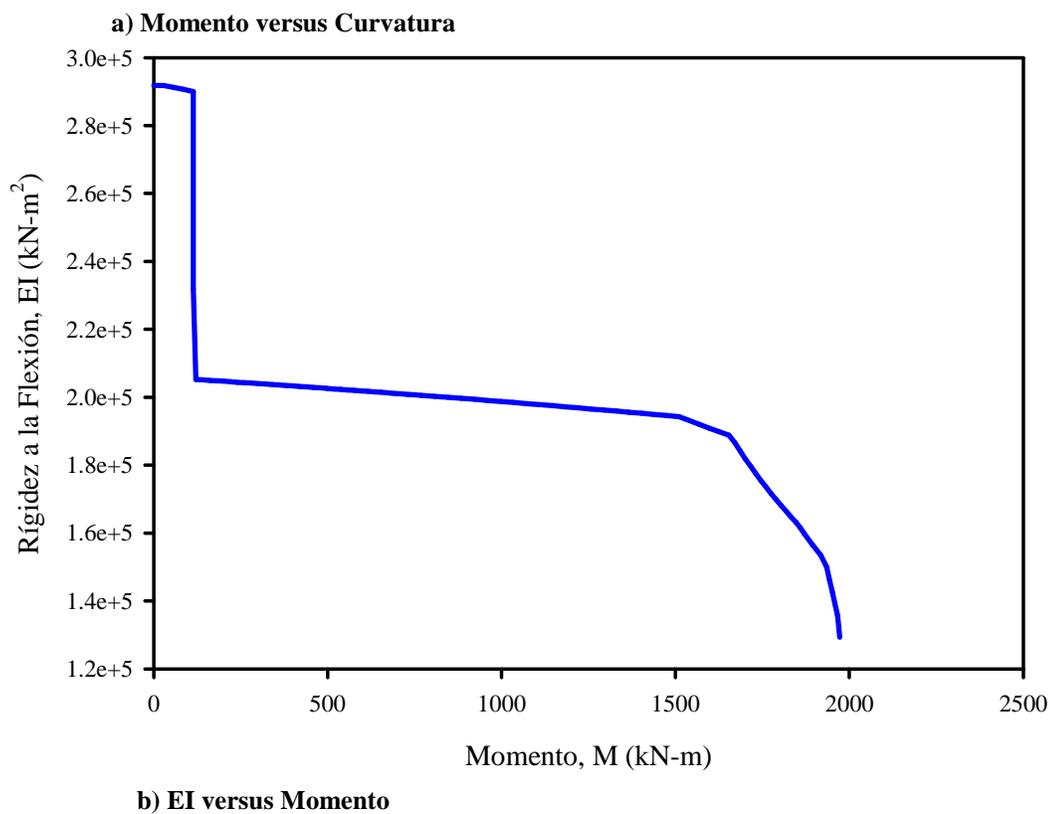
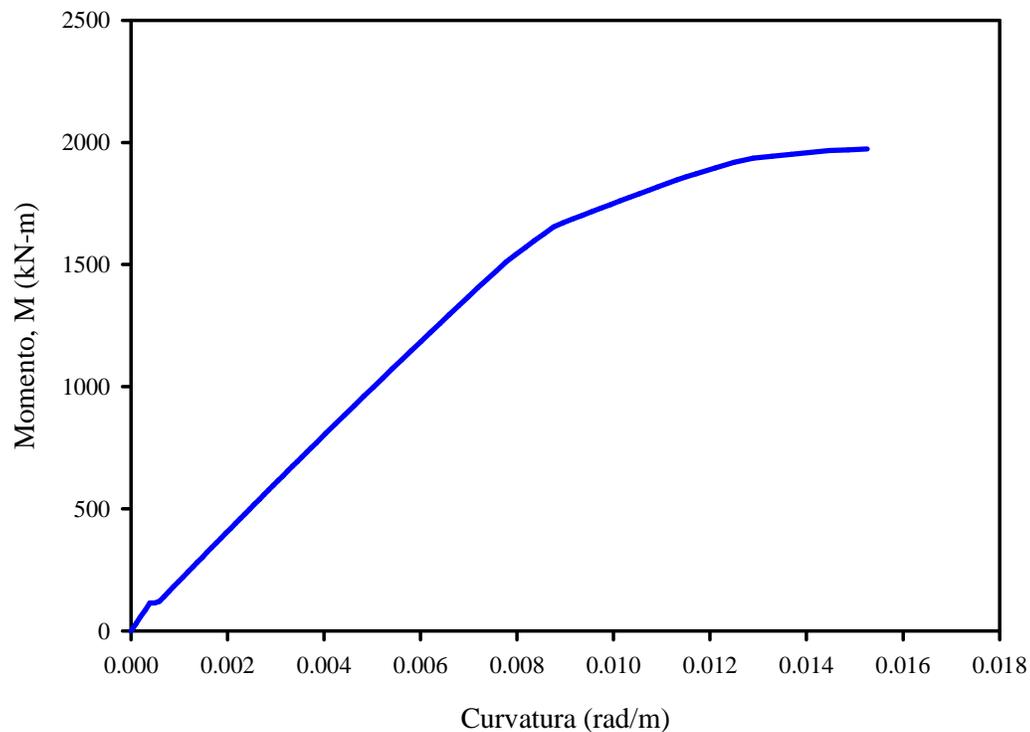


Figura 4-8. Relaciones no lineales del material del pilote utilizado en el análisis.

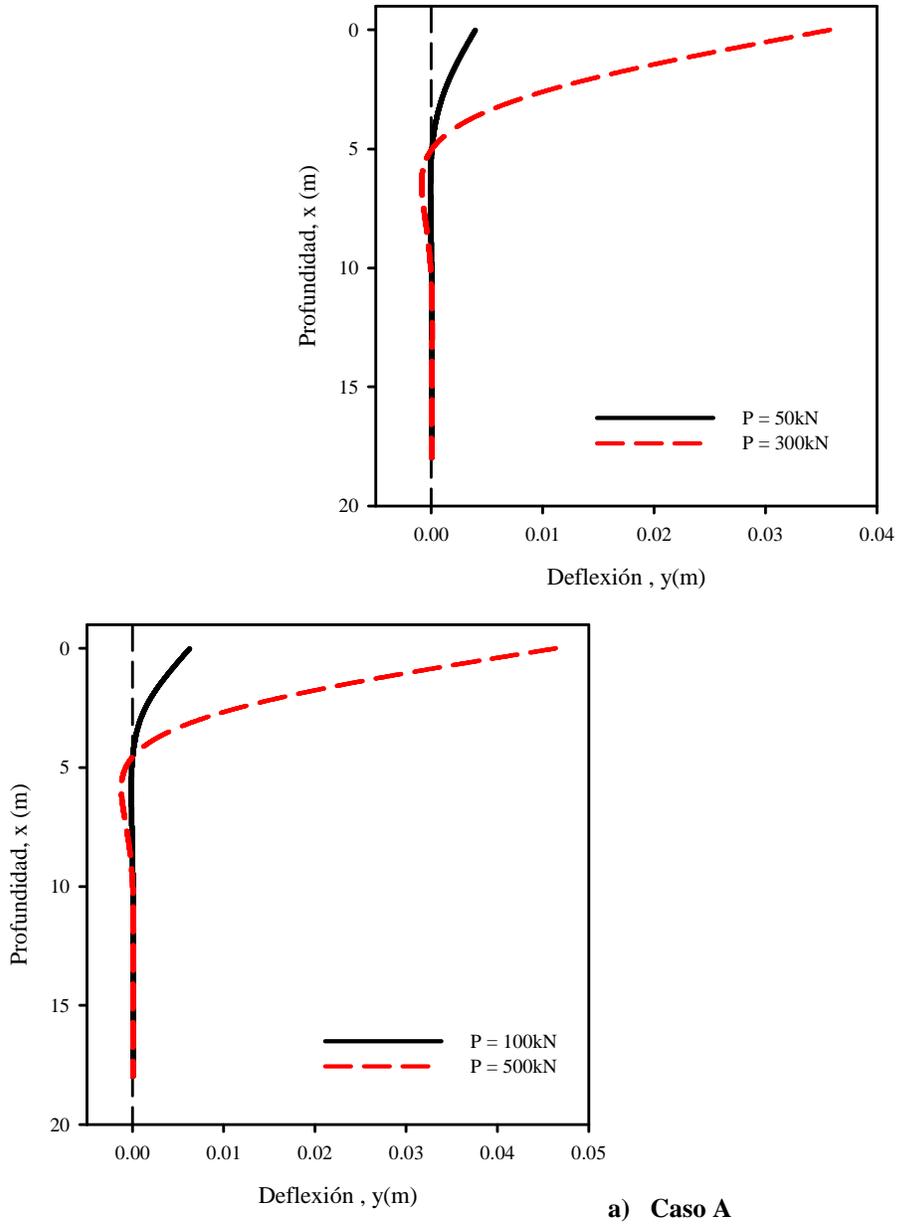
Tabla 4-2. Propiedades del suelo y del pilote utilizados en el análisis con LPILE para los pilotes con EI variables.

	Caso A	Caso B
Sección	Cuadrada	Cuadrada
Material	Hormigón	Hormigón
Diámetro (m)	0.610	0.610
Área (m²)	0.372	0.372
EI (kN-m²)	Figura 4-8 (b)	Figura 4-8 (b)
Peso específico del suelo (kN/m³)	15.7	19.7
Angulo Fricción interna suelo	30	35
k (MPa/m)	6.5	12
Curvas p-y (Arena)	Reese et al. (1974)	Reese et al. (1974)

Al igual que el análisis utilizando un pilote lineal, para este análisis se utilizó una discretización del pilote de 151 nodos. Al total de los datos de deformación que se obtienen con LPILE, se le sustrajo una cierta cantidad de puntos tal que, la cantidad neta de los datos de deformación sean equivalentes a la que se obtendrían si se utilizara un inclinómetro real.

La Figura 4-9a y 4-9b muestran las deflectadas para los casos A y B respectivamente. Se puede notar que a cargas relativamente bajas causantes de pequeñas deflexiones en el pilote, la forma deflectada del mismo es casi una línea recta lo cual dificulta el proceso de ajuste de curva polinómico cubico a la misma, sin embargo, como este pilote posee menor EI, a pequeñas cargas el mismo se deforma más que el pilote lineal presentado en la subseccion anterior. Por esta razón, es relativamente más fácil ajustar un polinomio cubico a este pilote que al pilote de la sección 4.3.1 A diferencia del pilote lineal, para cargas más significativas, la deflectada del pilote presenta mayores deformaciones y una forma más o menos lineal, lo cual también dificulta el proceso de ajuste de curva polinómico cubico.

La distribución de momentos obtenidos al aplicar la metodología propuesta a las deflectadas mostradas en la Figura 4-9 son mostradas en la Figuras 4-10 y 4-11 tanto como para el caso de baja deformación como para el de alta deformación.



Caso B

Figura 4-9. Deflectada de los pilotes hipotéticos para diferentes cargas laterales.

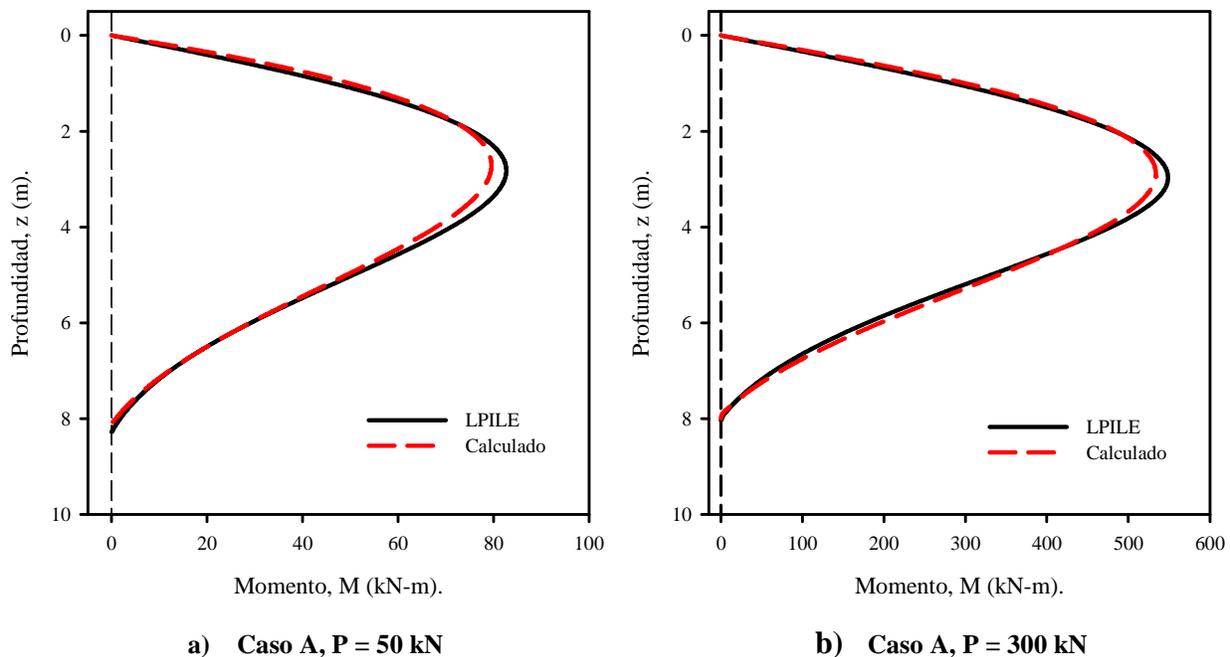


Figura 4.10. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso A para dos diferentes niveles de carga lateral.

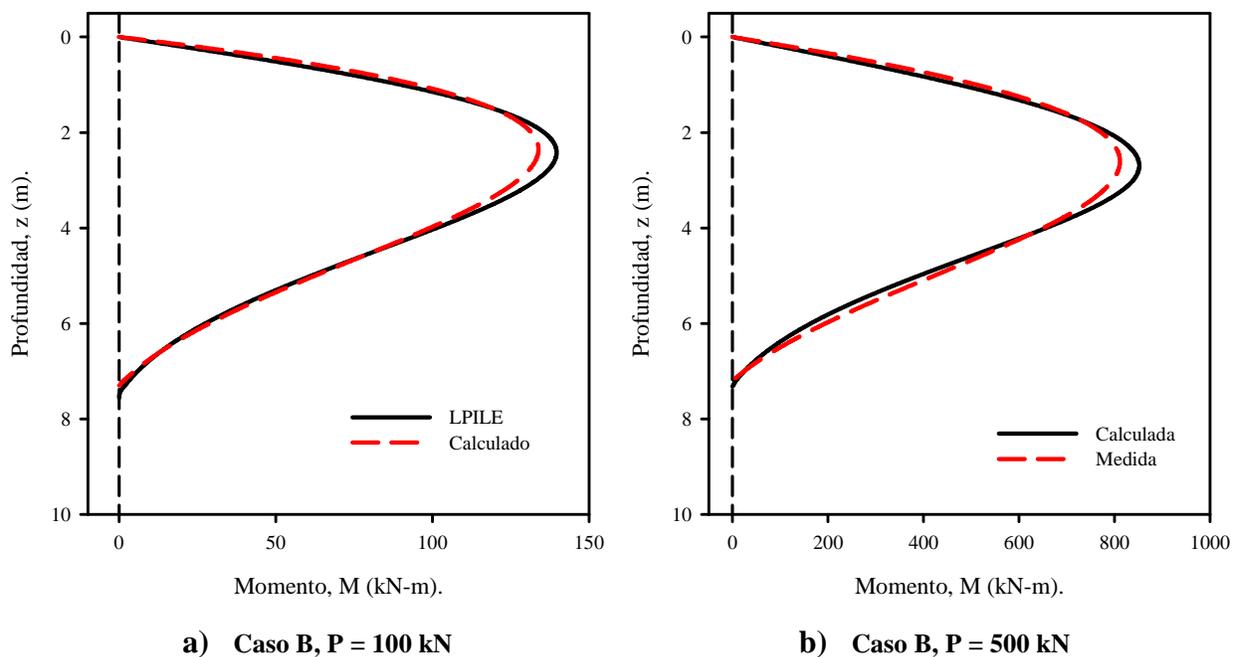


Figura 4.11. Comparación entre la distribución de momentos calculada y determinada con LPILE para el Caso B para dos diferentes niveles de carga lateral.

Para ambos Casos, a niveles de deformaciones altas y bajas se aprecia una buena predicción de la distribución de los momentos con la profundidad. En ambos casos se presenta una subpredicción del momento máximo y una buena predicción del punto de cero momento. Para este pilote, que fue modelado utilizando un comportamiento no lineal del material, el cálculo de la distribución de los momentos con la profundidad no fue tan acertado con en caso del pilote lineal-elástico. Esto se debe posiblemente a que como el pilote no lineal pierde bastante de su EI poco después de que se agrieta el hormigón, el pilote se vuelve tan flexible que se deforma mucho en poca profundidad, lo que se traduce en una forma casi lineal de la delfectada del pilote lo cual dificulta el proceso de ajuste de curva.

Como el propósito principal del uso de esta metodología en esta tesis es aplicarla a los pilotes de las pruebas de cargas laterales del caso histórico de Hampton, Virginia, se decidió obtener las curvas p-y de los pilotes hipotéticos no lineales y compararlos con las curvas p-y de Reese et al. (1974) a diferentes profundidades obtenidos con LPILE. En la Figura 4-12 se comparan las curvas p-y calculadas a 2 y 3 m de profundidad con las curvas p-y obtenidas con LPILE para el Caso A. Para las dos profundidades se apreciar una predicción bastante buena de las curva p-y. Aplicando el procedimiento descrito en la sección 4.2 no se pudieron obtener valores constantes de p_{ult} , por el contrario, se obtuvieron valores muy por encima del mismo, estos presentaron una tendencia ascendente y no asíntota al eje de las abscisas como lo es el comportamiento de una curva p-y típica de la literatura.

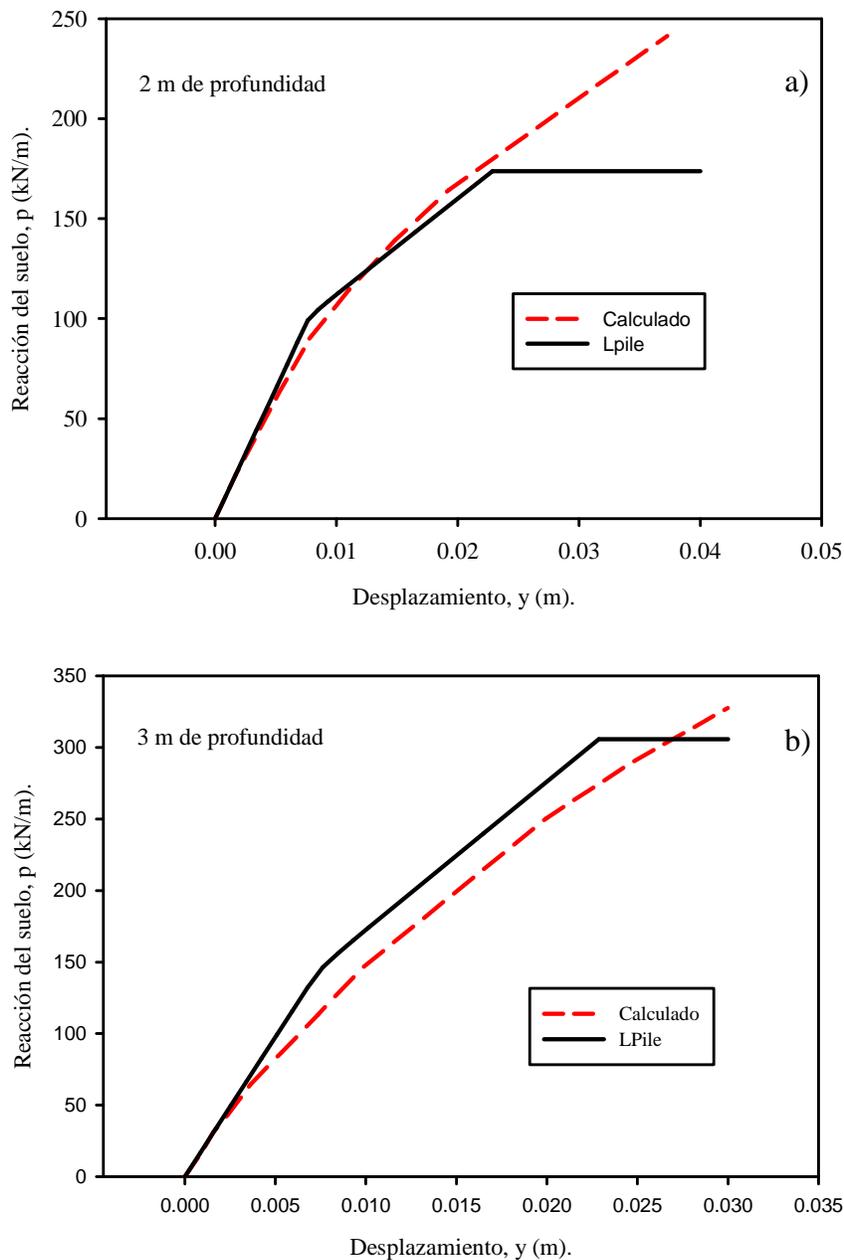


Figura 4-12. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso A.

La comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con LPILE para el Caso B a 2 y 3 m de profundidad se muestran en la Figura 4-13.

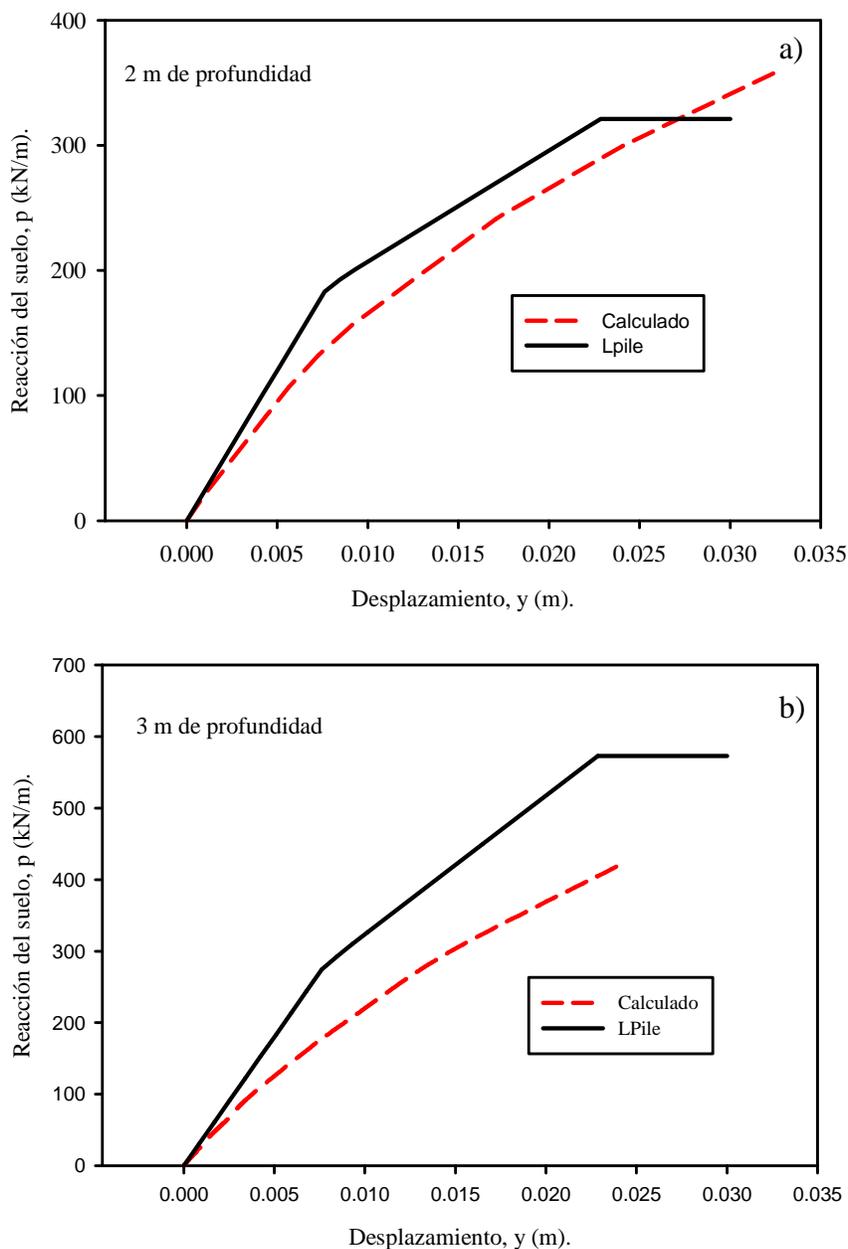


Figura 4-13. Comparación entre las curvas p-y calculadas y las obtenidas con el programa LPILE para el Caso B.

Para el Caso B las curvas p-y determinadas con la metodología propuesta no fue tan buena como la del Caso A. Al determinar la curva p-y a una profundidad de 2 m, esta presentó ligeras disminuciones en los valores de la reacción del suelo con la deflexión. Para la curva p-y determinada a una profundidad de 3m se presenta aun más este efecto en disminución del cálculo de la reacción del suelo con la deflexión. Este fenómeno puede estar ligado a que el punto de

pivote o punto de cero giro para éste caso está ubicado ligeramente más arriba que el del pilote del Caso A. En la Figura 4-12b se puede empezar a notar éste efecto en la curva p-y para el Caso A. Si ahora este punto de pivote se encuentra más arriba, éste efecto puede empeorar y arraigar en el cálculo de valores menores de la reacción del suelo que los que realmente son. Otra posible causa de la disminución en el cálculo de la reacción del suelo es que para este suelo y pilote el coeficiente de subrasante es muy alto y no es representativo de lo que sería un coeficiente de subrasante ideal para esta situación (como lo es el utilizado en el caso A). Si se utiliza un valor del coeficiente de subrasante alto, esto causará un aumento en la pendiente inicial de la curva p-y lo que se traduce en un aumento en las reacciones asociadas a la misma cantidad de deflexión del pilote. En suelos arenosos, éste es un efecto que aumenta con la profundidad, y puede incurrir en errores en el cálculo de las curvas p-y utilizando la metodología propuesta.

4.4. Resumen y conclusiones

En este capítulo se presentó la descripción del procedimiento utilizado para determinar la distribución de momentos a lo largo del pilote y las curvas p-y desde datos de deflexión obtenidos utilizando inclinómetros. También se presentó la calibración del método utilizando los datos de deflexión obtenidos con LPILE. El proceso de calibración fue bastante útil para validar el método y saber cuáles son sus limitantes, y así poder utilizarlo en los pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia.

A continuación se presenta un conjunto de conclusiones y limitantes de la metodología propuesta obtenidos a raíz del proceso de calibración:

1. Un buen estimado de la distribución de momentos con la profundidad se puede obtener con el procedimiento propuesto.
2. Considerando que se efectúa hasta la cuarta derivada de la deflexión del pilote, un buen estimado de las reacciones del suelo-pilote es obtenido utilizando la metodología propuesta.
3. El procedimiento puede ser usado para determinar las curvas p-y con buena exactitud a pilotes cuyo material se comporte en el rango lineal-elástico.

4. El procedimiento puede ser utilizado para determinar las curvas p-y a pilotes cuyo material se comporte en el rango no lineal, pero se deben tomar precauciones en el caso de grandes deformaciones del pilote las cuales generan una forma casi plana de la deflectada, dificultando así el proceso de ajuste de curva polinómico cubico.
5. La metodología propuesta puede ser utilizada para determinar con bastante exactitud el módulo tangencial máximo de la curva p-y también conocido como módulo de subrasante.
6. El método no es muy efectivo si se desea obtener las curvas p-y a profundidades cercanas a la superficie o a profundidades cercanas al punto de pivote o punto de cero giro del pilote.

5. PRUEBAS DE CARGA LATERAL DE 3 PILOTES EN HAMPTON, VIRGINIA

5.1. Introducción

La influencia de las rigideces a la flexiones sobre las reacciones generadas en el suelo se puede estudiar usando resultados de pruebas de carga en pilotes instrumentados. Aunque escasos para esta tesis, se decidió utilizar 3 pruebas de carga lateral realizadas por Pando (2003) en Hampton, Virginia. Los análisis realizados para esta tesis ese presentaran en el capítulo 6. El autor de esta tesis no formó parte de nada de lo que se describe en este capítulo, sin embargo, presentar la descripción de este caso histórico en esta tesis es necesaria para proporcionar información relevante acerca de los pilotes de prueba, condiciones del sitio de prueba, instrumentación de los pilotes y detalles de la prueba de carga lateral necesarios para comprender el capítulo 6.

En este caso histórico se realizaron pruebas de cargas laterales a 3 pilotes bien instrumentados de aproximadamente el mismo diámetro o ancho y profundidad instalados en condiciones similares pero con valores bastante diferentes de sus rigideces a la flexión (EI). Este capítulo describe la información más relevante recopilada por Pando (2003) sobre los pilotes ensayados, sus dimensiones y propiedades estructurales así como también las condiciones geotécnicas del sitio de prueba. También se presenta una descripción de la instrumentación y arreglo del ensayo utilizado en cada pilote. Al final del capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de cargas laterales. Una descripción más detallada acerca de éste caso histórico de pruebas de carga laterales de 3 pilotes ensayadas en Hampton, Virginia se puede encontrar en Pando (2003).

5.2. Descripción de los pilotes de prueba

Pando (2003) ensayó tres pilotes en Hampton, Virginia. Un pilote de hormigón, un pilote compuesto conformado por un tubo de fibra de vidrio (GFRP) y núcleo interno de hormigón armado, y un pilote compuesto de plástico reciclado reforzado con una camada de refuerzo de acero soldada a estribos en espiral. Las secciones transversales de los tres pilotes de pruebas ensayados se muestran en la Figura 5.1.

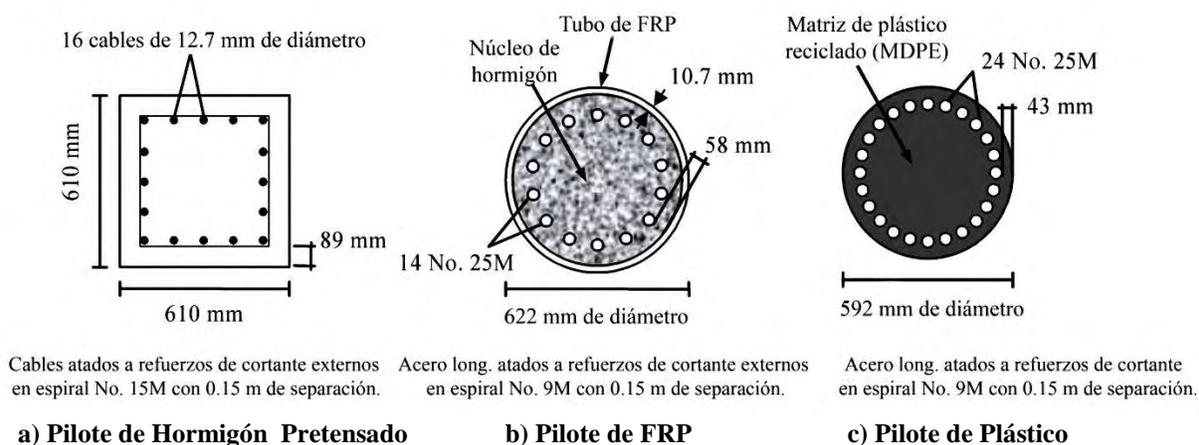


Figura 5-1. Secciones transversales de los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).

Los tres pilotes de prueba tenían la misma longitud de 18.3 m (60 ft) y fueron instalados por hincado con un martillo hidráulico. Los pilotes se instalaron en un sitio aledaño a un proyecto de reemplazo de un puente donde las condiciones geotécnicas se consideraron relativamente uniformes para los tres pilotes. A continuación se presenta una descripción más detallada de los tres pilotes ensayados.

5.2.1. Pilote de hormigón pretensado

El pilote de hormigón pretensado (PSC) era de sección cuadrada de 610 mm y 18 m de longitud. El pilote fue pretensado con 16 cables de acero de 12.7 mm (No. 13M) de diámetro. Cada cable de pretensado estaba conformado por 7 hebras o filamentos entrelazados con un esfuerzo de fluencia de 1.85 GPa. El esfuerzo de cortante del pilote consistió en una espiral

continua hecha con una varilla de 15.875 mm (No. 16M) de diámetro con una separación a 15 cm. La resistencia a la compresión a los 28 días especificada para el hormigón fue de 35 MPa. Los resultados de los ensayos de compresión no confinada mostraron una resistencia del hormigón de 55 MPa al momento en que fue efectuada la prueba de carga.

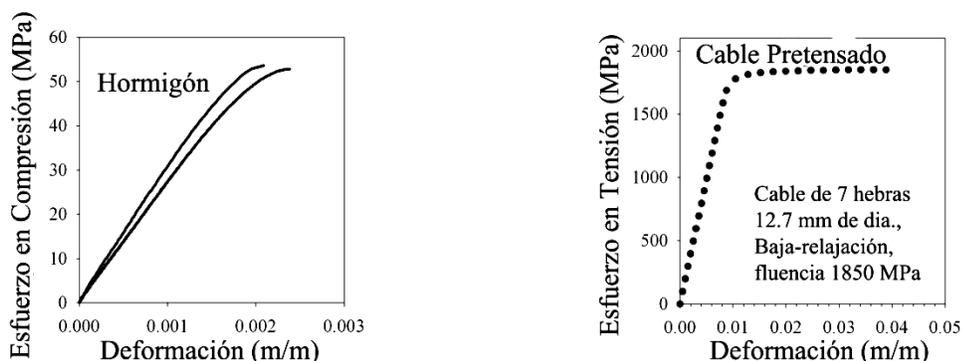
La Figura 5-2 (a) muestra los diagramas de esfuerzo-deformación para los materiales que conforman este pilote. Los diagramas de esfuerzo deformación del hormigón fueron obtenidos de pruebas de laboratorio. El diagrama del cable de acero muestra un esfuerzo de fluencia de 1.86 GPa. Basado en estos diagramas de esfuerzo deformación y la geometría de la sección transversal mostrado en la Figura 5-1(a) se computó la rigidez a la flexión y su variación con curvatura. Pando (2003) reportó un valor inicial de EI de 355,610 kN-m². El diagrama de momento-curvatura y la variación de la rigidez a la flexión como función del momento aplicado se muestran en la Figura 5-3. Estos valores fueron calculados por Pando (2003) utilizando los procedimientos descritos por Collins y Mitchell (1997).

5.2.2. Pilote compuesto de FRP y hormigón

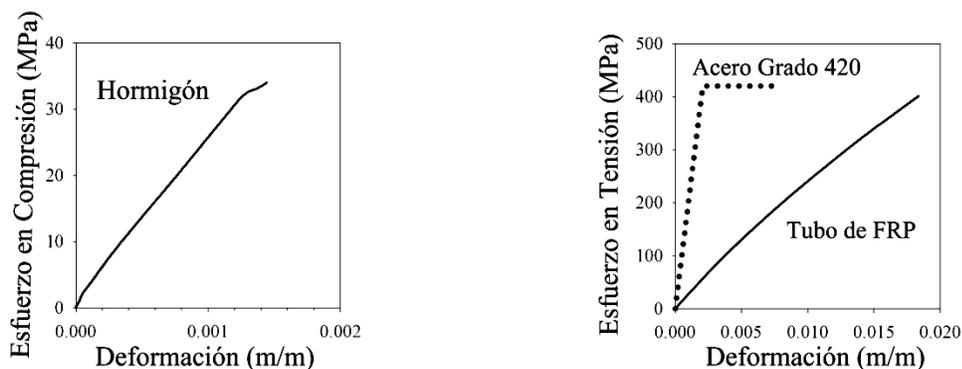
El pilote compuesto está formado por un tubo de Polímero Reforzado con Fibra (FRP) lleno de hormigón y reforzado con varillas. El tubo de FRP consta de un diámetro externo de 622 mm, un espesor de la pared del tubo de 10.7 mm y una longitud de 18.3 m. El polímero utilizado es una resina Derakane vinil-éster de Dow, y el refuerzo de fibra de vidrio consistió en un arreglo de cuatro pliegues de fibra de vidrio. Cada pliegue de fibra está formado por cuatro capas de fibras orientadas a 0, +45, -45 y 90 grados con respecto al eje longitudinal del tubo. El espesor promedio de cada pliegue es 1.93 mm.

Antes del hincado de los pilotes, el tubo fue llenado de hormigón no encongelable con un tamaño de agregado máximo de 19mm y un aditivo *Sika Viscocrete* para proporcionar fluidez y lograr un hormigón que se compacte solo. A los 7 días, la resistencia a la compresión del hormigón fue de 27.4 MPa, y la resistencia a la compresión al momento de la prueba fue de 34 MPa. El pilote está reforzado con 14 varillas de 24.4 mm (No. 25M) de diámetro grado 420. Los estribos en forma de espiral son varillas de 9.525 mm (No. 10M) espaciados a 150 mm. La

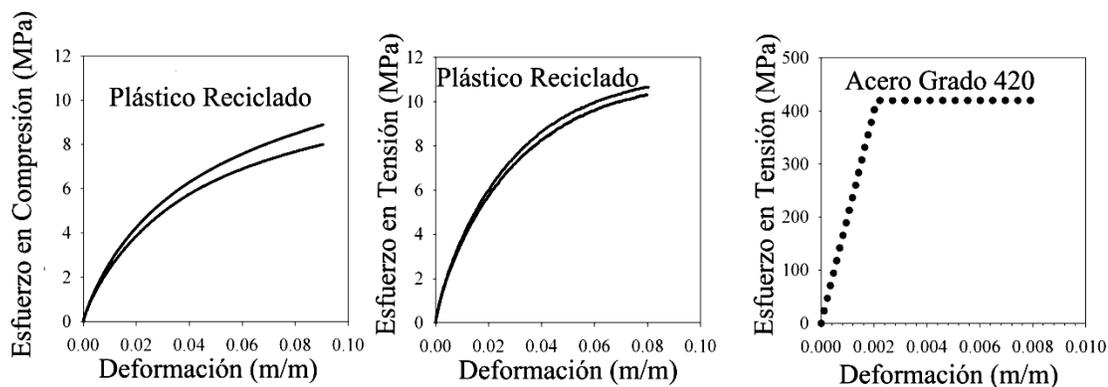
Figura 5-2 (b) muestra los diagramas de esfuerzo deformación para este pilote. De acuerdo a estos diagramas de esfuerzo deformación, la rigidez a la flexión inicial del pilote es $186,509 \text{ kN-m}^2$. La Figura 5-3 muestra la relación de momento-curvatura y la variación de la rigidez a la flexión con el momento los cuales se calcularon utilizando los procedimientos descritos por Fam (2000).



a) Pilote Hormigón Pretensado



b) Pilote de FRP



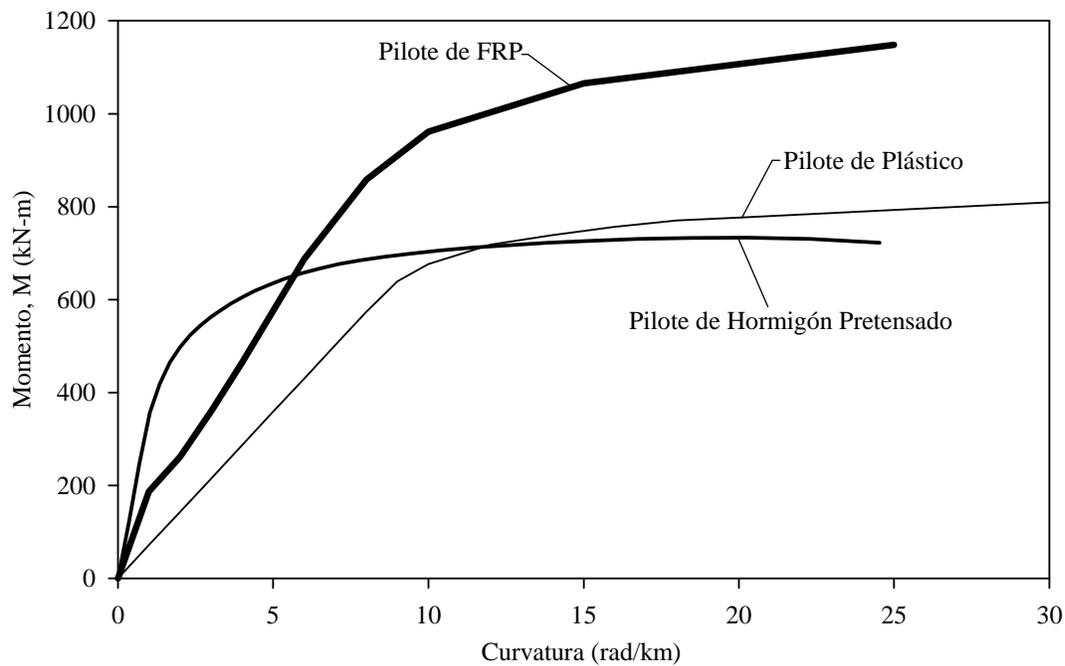
c) Pilote de Plástico

Figura 5-2. Diagramas de esfuerzo deformación de los materiales que conforman los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).

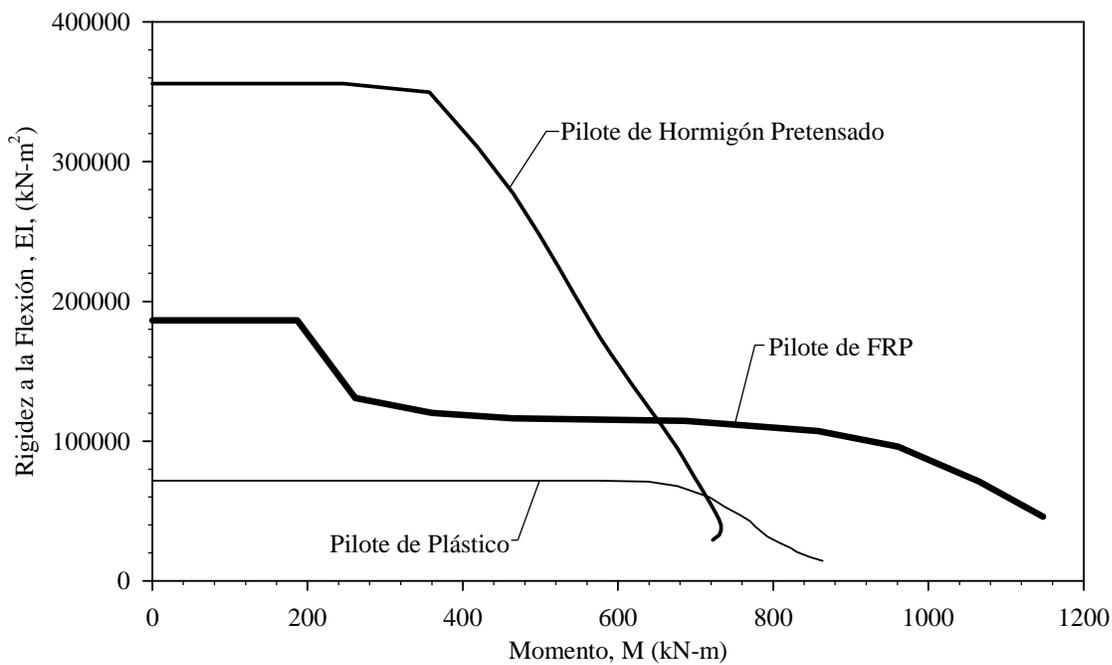
5.2.3. Pilote de polietileno

El pilote compuesto de polietileno (PPI) consiste en una matriz de plástico reciclado y un armado de acero. La matriz de plástico reciclado tiene una densidad final que va desde 7.1 a 9.4 kN/m^3 . El módulo de Young del plástico esta especificada por el fabricante a ser por lo menos 275 MPa. El pilote esta reforzado con 24 varillas de 24.4 mm (No. 25M) de diámetro grado 420. Los estribos en forma de espiral son varillas de 9.525 mm (No. 10M) espaciados a 230 mm las cuales fueron soldadas a las varillas longitudinales. El pilote es fabricado sometiendo el plástico fundido dentro de un molde a presiones de 3.4 MPa, bajo una temperatura de 260 °C. El pilote de plástico posee un diámetro de 592 mm y una longitud de 18.3 m. Antes de verter el plástico fundido dentro del molde, un tubo de acero de 141 mm de diámetro externo con un espesor de la pared del tubo de 6.35 mm fue instalado, este tubo sirve como cubierta o forro inclinométrico para instalar los inclinómetros antes de que haga el vaciado del pilote. La razón de usar este tubo de acero fue por preocupaciones a que la cubierta estándar de los inclinómetros no fuera a sobrevivir las altas presiones y las altas temperaturas del proceso de moldeado del pilote de plástico.

La Figura 5-2 (c) muestra los diagramas de esfuerzo deformación del polietileno y el acero que componen el pilote de polietileno. Los diagramas de esfuerzo deformación del polietileno fueron obtenidos de pruebas de laboratorio, y el diagrama del acero muestra el mínimo esfuerzo de fluencia especificado para un acero de grado 420. Basado en estos diagramas de esfuerzo deformación, la rigidez a la flexión inicial del pilote es 71,705 kN-m^2 . La Figura 5-3 muestra la relación de momento-curvatura y la variación de la rigidez a la flexión con el momento utilizando los mismos conceptos de deformación y equilibrio utilizados en los otros dos pilotes (Collins y Mitchell, 1997, Fam, 2000).



a) Relación Momento-Curvatura



b) Rigidez a la flexión en función del momento aplicado

Figura 5-3. Características de la rigidez a la flexión de los tres pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).

5.3. Características geotécnicas del suelo

El programa de prueba de los pilote fue llevado a cabo en un área proyectada sobre el río Hampton, cerca de la Ruta 351 que pasa por encima del río Hampton en la bahía de Chesapeake en Virginia. La Figura 5-4 muestra el mapa de localización del área de prueba de los pilotes.

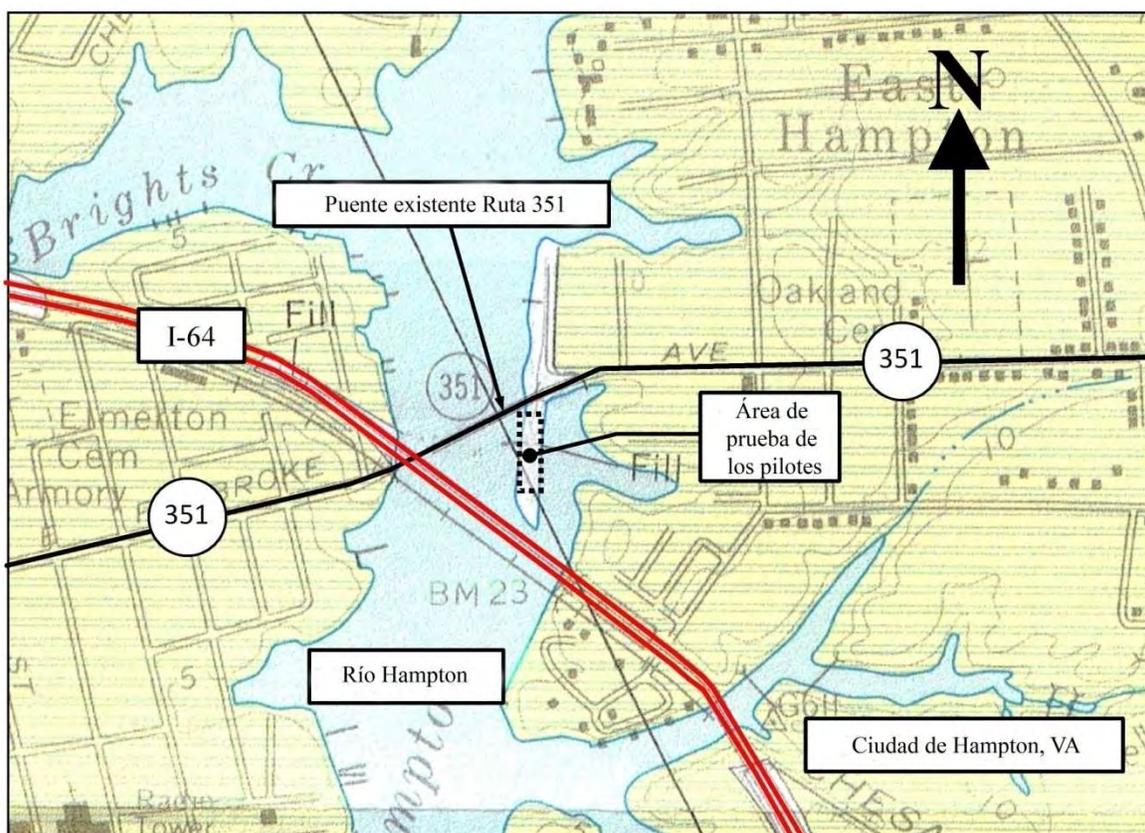


Figura 5-4. Mapa de localización del sitio de prueba (adaptado de Pando 2003).

5.3.1. Condiciones del subsuelo

La estratigrafía del suelo del área de prueba se muestra en la Figura 5-5. La capa superior en el área de prueba de los pilotes está formada por un relleno de arena fina limosa, esta tiene un espesor de aproximadamente 1 m. Debajo del relleno se encuentra una capa de arena fina limosa en estado suelto a medianamente denso, éste se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 13 m. Debajo de esta capa de arena fina limosa se encuentra una capa de arcilla arenosa de consistencia rígida, esta se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 15.5 m. Por último, debajo de esta capa de arcilla arenosa se encuentra una capa de arena limo-arcillosa en estado medianamente denso a denso, esta capa se extiende hasta el final del barreno hasta una profundidad de 30.6 m. La altura del nivel freático es controlada por el río Hampton y se encuentra a una profundidad de 0.9 a 1.5 m por debajo del nivel del suelo.

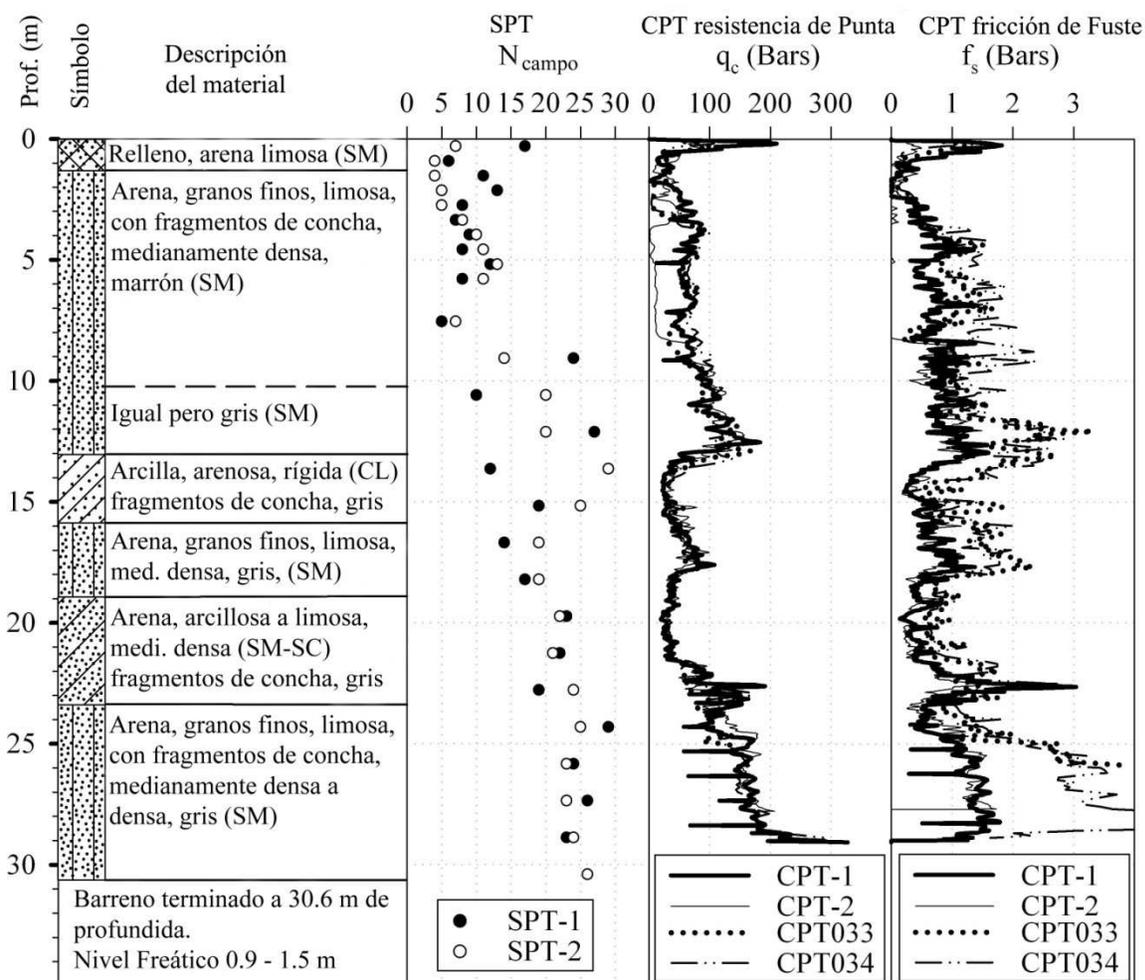


Figura 5-5. Estratigrafía geotécnica del área cercana al sitio de prueba de los pilotes (adaptado de Pando 2003).

La investigación del subsuelo fue realizada con dos barrenos de vástago hueco “*hollow stem auger*”, cuatro pruebas del penetrómetro de cono y una prueba de dilatómetro. La localización de los barrenos, las pruebas de cono y dilatómetro son mostradas en la Figura 5-6. Los barrenos fueron realizados usando las técnicas de perforación de vástago hueco, y pruebas de penetración estándar (SPT), la cual fue realizada utilizando un martillo de seguridad. Los valores del N de campo junto con una descripción del perfil de suelo son mostrados en la Figura

5-5. La Figura 5-5 también muestra la resistencia de punta y la fricción de fuste obtenidos en las pruebas cuatro pruebas de conos (CPT) realizadas.

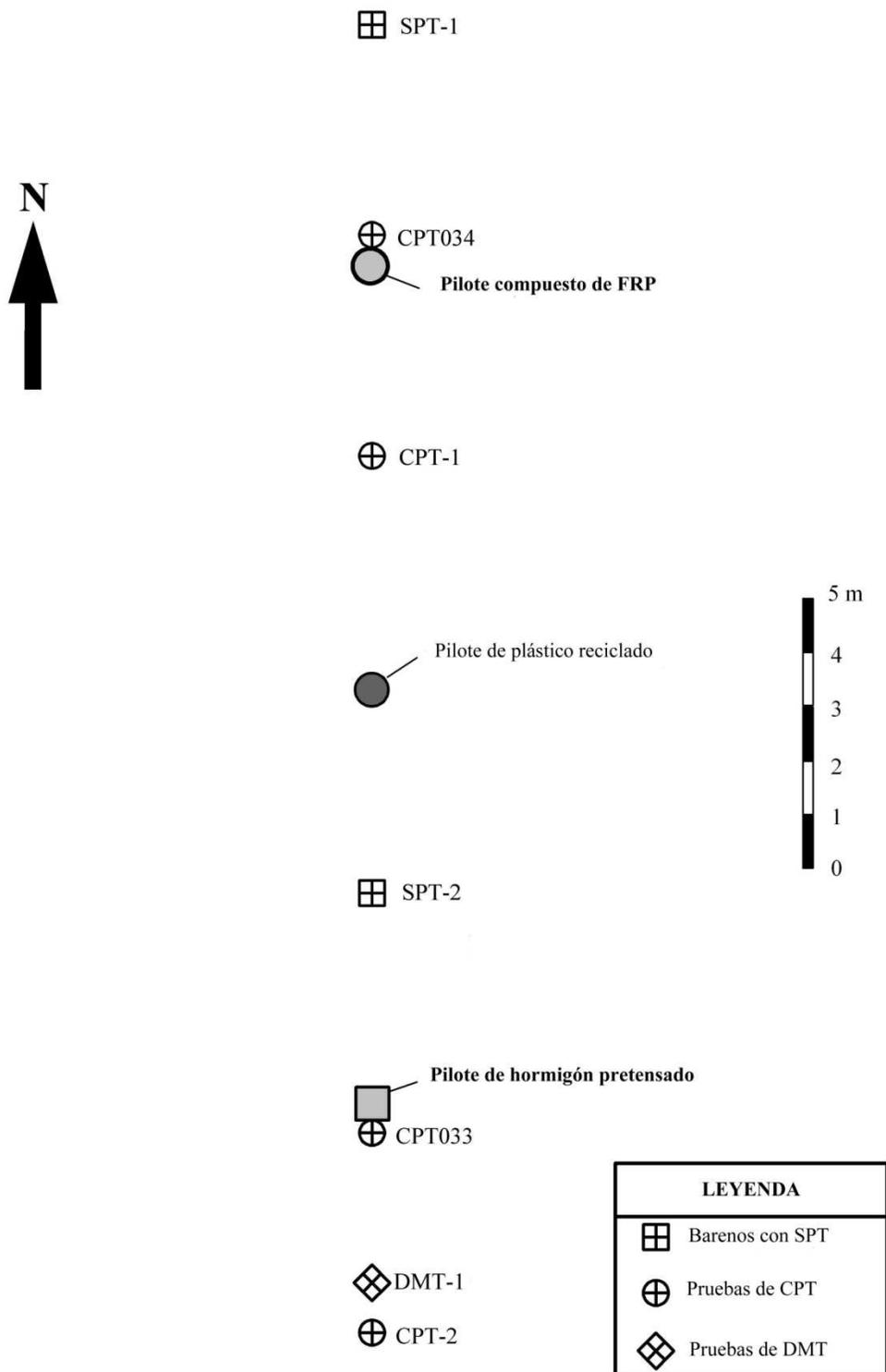


Figura 5-6. Ubicación de los pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).

5.4. Arreglo de los pilotes en las pruebas de carga lateral

Las condiciones o arreglo de cada pilote de prueba al momento de efectuar las pruebas de carga lateral en éste caso histórico son muy distintas entre un pilote y otro. La buena determinación del arreglo de los pilotes como el punto de aplicación de la carga, la altura de la cabeza del pilote por encima de la superficie del terreno y cualquier otra condición que se presente al momento de la prueba de carga son muy importantes para poder interpretar los resultados y para el posterior modelado de los pilotes para fines de análisis.

Las Figuras 5-7, 5-8 y 5-9 muestran los arreglos de los pilotes de PSC FRP y PPI respectivamente al momento de efectuarse las pruebas de carga lateral, las medidas indicadas en cada Figura están representadas en metros. Se puede notar que el punto de aplicación de la carga para los 3 pilotes de prueba se encuentra localizado a diferentes elevaciones por debajo o sobre la superficie del terreno. Para el pilote de PSC las cargas laterales fueron aplicadas prácticamente al nivel de la superficie del terreno. Estas fueron aplicadas a una distancia de 0.10 m por debajo del nivel de la superficie del terreno.

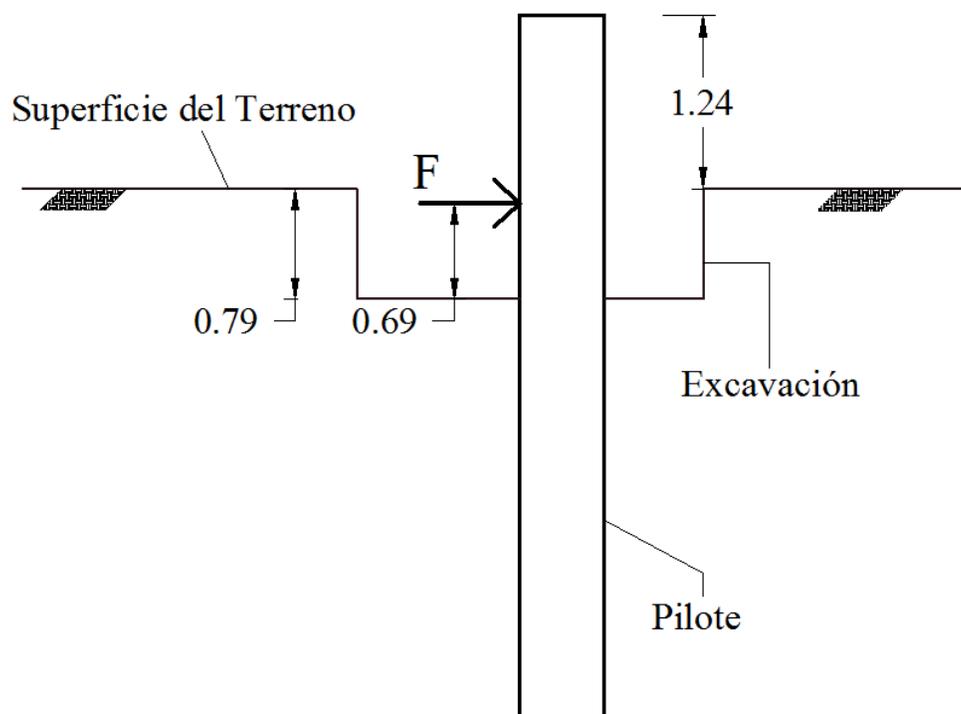


Figura 5-7. Arreglo del pilote de PSC al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.

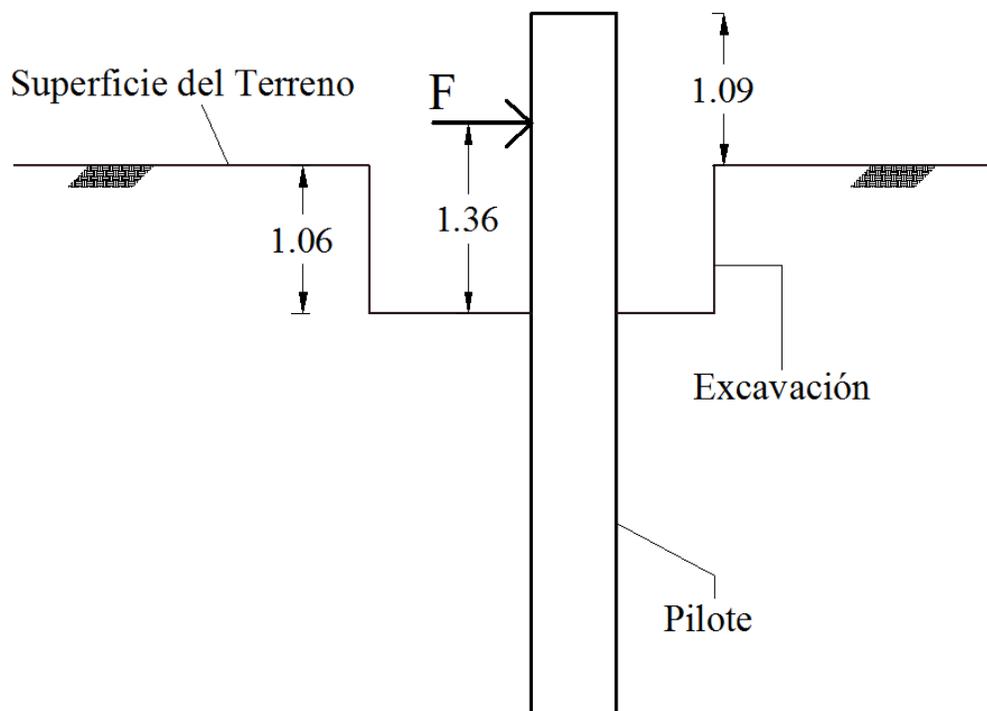


Figura 5-8. Arreglo del pilote de FRP al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.

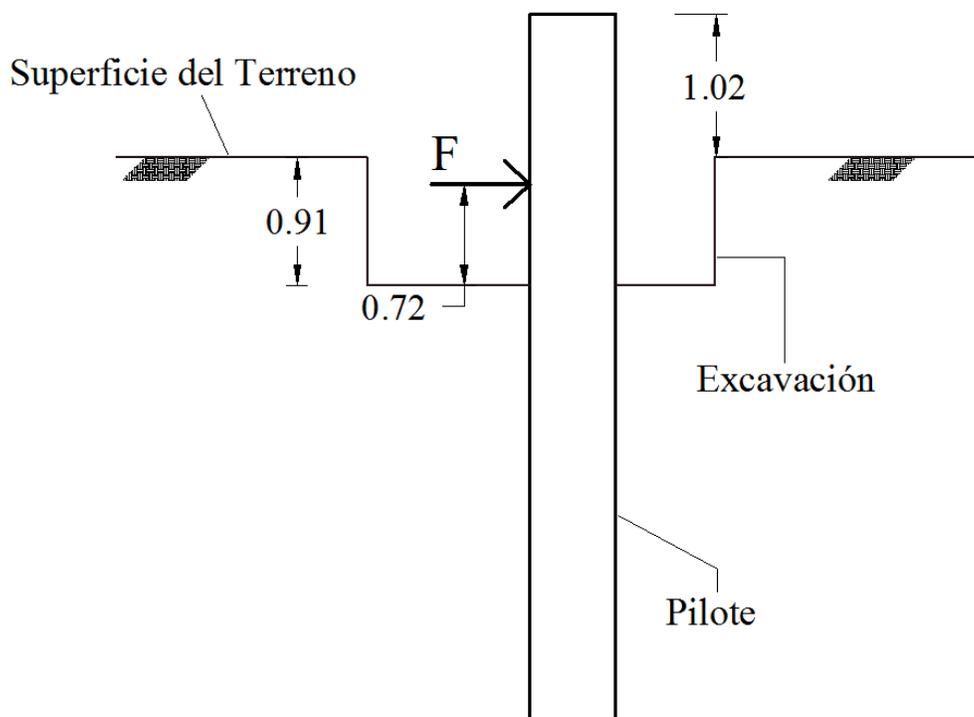


Figura 5-9. Arreglo del pilote de PPI al momento de efectuarse la prueba de carga lateral.

Para el pilote de FRP el punto de aplicación de las cargas laterales está ubicado a 0.30 m por encima del nivel de la superficie del terreno. En el caso del pilote de PPI el punto de aplicación de las cargas laterales se encuentra a 0.19 m por debajo del nivel de la superficie del terreno. También se puede notar de las Figuras que se realizó una excavación alrededor del perímetro de los pilotes de prueba para facilitar el proceso de hincado al inicio de la hinca. Para tener una idea del área transversal de estas excavaciones comparadas con el área transversal de los pilotes, en la Figura 5-10 se presentan unas fotografías donde se aprecia que tan grande es el área excavada para los pilotes de PSC y FRP.

Estas excavaciones realizadas alrededor del perímetro de los pilotes y la altura a la que se encuentran aplicadas las cargas laterales, generan mayor cantidad de deflexión lateral el nivel de la superficie del terreno en comparación con un arreglo de un pilote que no tenga una excavación a alrededor del perímetro del pilote y que la ubicación de la carga lateral se encuentre prácticamente al nivel de la superficie del terreno.



a) Pilote de PSC



b) Pilote de FRP

Figura 5-10. Fotografía de los pilotes de PSC y FRP recién finalizada el proceso de la hincada de los pilotes (Pando 2003).

El propósito principal de realizar las pruebas de carga lateral a estos pilotes era determinar cómo sería el comportamiento de estos pilotes en términos de deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno y la en términos del perfil de deflexiones con la profundidad. Para poder obtener una buena resolución de la forma deflectada del pilote, un forro inclinométrico “*casing*” fue instalado en cada uno de los pilotes de prueba. Para captar la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno, dos relojes fueron instalados cercanos a la cabeza de cada pilote para así captar la pendiente generada al deflectarse el pilote en esta zona por encima del nivel de la superficie del terreno.

5.5. Resultados de las pruebas de carga lateral

Los resultados obtenidos desde las pruebas de cargas laterales realizadas a los tres pilotes son presentados en esta sección. Se comparan las cargas versus deflexión al nivel de la superficie del terreno, la forma deflectada y la distribución de momentos con la profundidad de los tres pilotes. También se discute como influye de la rigidez a la flexión del los pilotes en la cantidad de deflexión, la ubicación del punto de pivote, la magnitud de los momentos y la ubicación de los momentos máximos.

5.5.1. Carga lateral versus deflexión lateral

Cuando los pilotes son cargados lateralmente, la mayor cantidad de deflexión lateral se genera en el punto de aplicación de la carga. Como la aplicación de la carga generalmente se encuentra o se modela al nivel del terreno, es de sumo interés saber cuáles son los desplazamientos máximos al nivel de la superficie del terreno.

Es común pensar que un pilote más rígido se deformará menos que un pilote menos rígido bajo las mismas condiciones de carga. Esta suposición no suele ser siempre cien por ciento acertada, ya que la cantidad de deflexión del pilote depende no solo de las propiedades del pilote, sino también de las propiedades del suelo. La Figura 5-11 muestra la relación de carga lateral versus deflexión en la superficie del terreno para los tres pilotes. En esta figura se puede notar que el pilote más rígido (pilote de hormigón pretensado) con un $EI = 355,610 \text{ kN-m}^2$ realmente no fue el que presentó la menor cantidad deflexión en la superficie del terreno. El que presentó la menor cantidad de deflexión en la superficie del terreno fue el pilote compuesto de FRP con núcleo de hormigón reforzado el cual tiene una rigidez a la flexión inicial $EI = 186,509.13 \text{ kN-m}^2$ el cual es aproximadamente la mitad de EI del pilote de hormigón pretensado. Esta diferencia en deflexión se debe mayormente a la diferencia entre las propiedades de los estratos de suelo más someros. Al comparar los valores de N de los barrenos SPT1 y SPT2 (Figura 3-5) los cuales están localizados próximos a los pilotes de FRP y de hormigón pretensado respectivamente, se puede notar que en los primeros 3 metros de profundidad existe una diferencia en densidades. El suelo donde esta hincado el pilote de FRP, en los primeros tres metros presenta una densidad

media lo cual puede ser la causa de que este pilote presentara menor cantidad de deflexión al nivel de la superficie del terreno. Por otro lado, el pilote de plástico reciclado fue el que presentó la mayor cantidad de deflexión en la superficie del terreno, éste tiene una rigidez a la flexión inicial $EI = 71,705 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ el cual es aproximadamente 5 veces menor al EI inicial del pilote de hormigón pretensado y 2.6 veces menor al EI inicial del pilote de FRP. Al compara las deflexiones de ambos pilotes se con la del pilote de plástico, se nota que el pilote de plástico se deflecta aproximadamente el doble de lo que se deflectan los otros dos pilotes. Es importante mencionar que las propiedades del suelo donde fue hincado el pilote de plástico son muy similares a las propiedades del suelo del pilote de FRP, por esto, las relaciones entre los EI y las deflexiones (aproximadamente 2) son muy similares. Al comparar estas mismas relaciones para el pilote de plástico y el de hormigón pretensado no se presenta la misma similitud, esto es por la diferencia entre las densidades de los estratos más cercanos a la superficie.

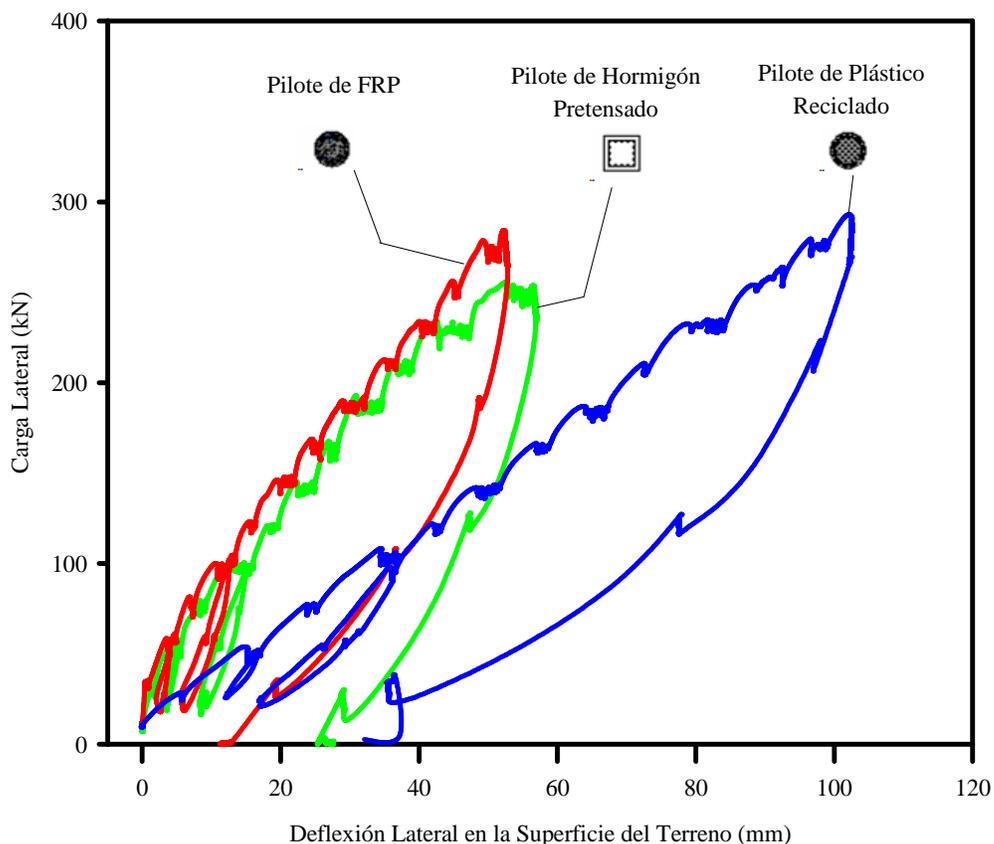


Figura 5-11. Deflexión lateral medida en la superficie del terreno para los tres pilotes de prueba (adaptado de Pando 2003).

5.5.2. Forma deflectada

La forma deflectada de los pilotes a diferentes incrementos de carga se obtuvieron utilizando un inclinómetro estándar sondeado a través de los forros inclinométricos instalados en cada pilote. Las formas deflectadas de cada pilote son mostradas en la Figura 5-12 junto con las elevaciones correspondientes a la superficie del terreno, el fondo de la fosa y el punto de aplicación de la carga, tomando punto de referencia la cabeza de cada pilote respectivamente. Se puede notar que a pesar de que el pilote de FRP exhibió aproximadamente la misma cantidad de deformación que el pilote de hormigón pretensado (siendo éste último el pilote con mayor rigidez a la flexión), el punto de pivote o punto de cero deflexión se encuentra mucho más cercano a la superficie en comparación con el punto de pivote del pilote de hormigón pretensado.

Este punto de pivote como se mencionó anteriormente en el Capítulo 2, es el punto que define la altura de la cuña que se genera al cargar un pilote lateralmente y depende directamente de la rigidez a la flexión del mismo y del punto de aplicación de la carga. La profundidad de este punto de pivote medido desde la cabeza de cada pilote es de aproximadamente 10, 6 y 7 m para los pilotes de hormigón pretensado, FRP y plástico reciclado respectivamente. Era de esperarse que el pilote más rígido afectara una zona más profunda del suelo en comparación con la zona afectada por pilotes menos rígidos. Se esperaba que la profundidad de esta zona afectada fuera ascendiendo a medida que iba ascendiendo la rigidez a la flexión del pilote, pero en éste caso, el pilote que presentó la menor profundidad de la zona afectada fue el pilote de FRP, esto se debe a que el material del pilote se comporta fuera del rango elástico a menor cantidad del momento de agrietamiento en comparación con el de los otros dos pilotes (Figura 5-3b), esto se traduce en una disminución en la rigidez a la flexión del pilote en presencia de menores magnitudes de los momentos aplicados.

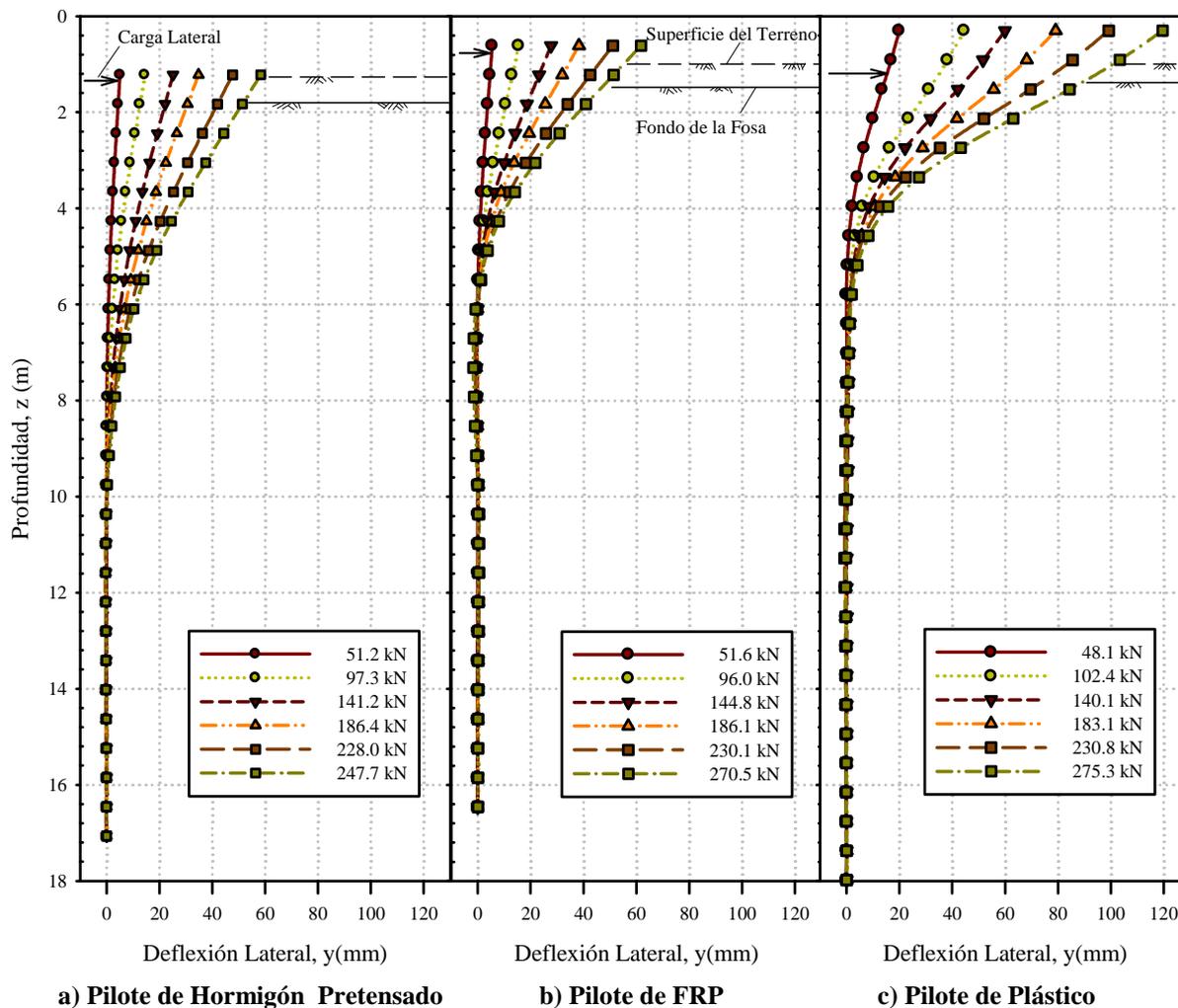


Figura 5-12. Forma deflectada de los pilotes para diferentes niveles de carga lateral.

5.6. Resumen y conclusiones

Un programa de prueba de carga fue llevado a cabo para poder permitir la comparación del comportamiento bajo cargas laterales de tres pilotes: [1] uno convencional, pilote de hormigón pretensado cuadrado de 610 mm de diámetro; [2] un pilote compuesto de 622 mm formado por un tubo de FRP relleno de hormigón y reforzado con un armado de acero; y [3] un pilote de polietileno de 592 mm de diámetro reforzado con barras de acero. Ensayos de laboratorio fueron realizados a los materiales de los pilotes para determinar sus propiedades. Los

pilotes tienen una longitud de aproximadamente 18 m de largo. Se realizó una investigación del subsuelo en el lugar del sitio de prueba, el cual consta mayormente de arena suelta y medianamente densa con un pequeño estrato de arcilla arenosa de consistencia rígida con un espesor de 2.5 m localizada de 1 a 3.5 m sobre el pie de los pilotes. Las siguientes conclusiones se pueden presentar desde los resultados de las pruebas de carga:

1. El pilote de hormigón pretensado es el que presenta mayor rigidez a la flexión, luego le sigue el pilote de FRP y luego el pilote de plástico reciclado.
2. Aunque el EI del pilote de hormigón pretensado tiene un EI que es aproximadamente el doble del EI del pilote de FRP ambos presentaron deflexiones similares al nivel de superficie del terreno.
3. El pilote de plástico (menor EI) fue el que presentó mayor cantidad de deflexión al nivel de la superficie del terreno.
4. El punto de pivote o de cero deflexión el cual define la altura de la cuña pasiva depende del EI del pilote y del punto de aplicación de la carga.

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE LOS 3 PILOTES DE PRUEBA DEL CASO HISTÓRICO DE HAMPTON, VIRGINIA

6.1 Introducción

Se desea analizar cuál es la influencia del EI en la reacción del suelo en un caso real. Para esto se realizaron análisis de los pilotes de pruebas del caso histórico de Hampton, Virginia descrito en el Capítulo 5 utilizando dos programas comerciales, LPILE y SWM. En este capítulo se presentan los análisis de los 3 pilotes utilizados en las pruebas de carga lateral localizadas en Hampton Virginia. Los análisis de los tres pilotes consistieron en buscar el modelo que mejor se ajustara al perfil de deflexiones con las cargas aplicadas obtenidas de las pruebas de carga lateral. Los análisis mostrados en este capítulo comparan el perfil de deflexiones laterales con la profundidad y la deflexión al nivel de la superficie del terreno obtenidas desde las pruebas de carga lateral con las obtenidas con LPILE y SWM. Este capítulo también presenta las curvas p-y a diferentes profundidades obtenidas con LPILE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4. Con estas curvas p-y se estudió cual es la influencia del EI en la reacción del suelo para pilotes y perfiles estratigráficos reales.

6.2. Análisis utilizando LPILE 5.0 basado en curvas p-y

Con la finalidad de obtener una buena aproximación de las reacciones del suelo representadas por las curvas p-y, primero es necesario obtener una buena aproximación del perfil de deflexiones a lo largo del pilote. Como la metodología de las curvas p-y y por lo tanto LPILE funcionan de forma iterativa, donde, se busca la solución a la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente utilizando el método de diferencias finitas. El proceso iterativo comienza asumiendo una pendiente secante de la curva p-y (módulo de

subrasante E_{p-y} a cierta cantidad de deflexión lateral y reacción del suelo) y resolviendo la ecuación diferencial (utilizando las condiciones de borde proporcionadas) para obtener las deflexiones a la profundidad de interés. Éste termina cuando los valores de deflexión obtenidos al resolver la ecuación diferencial y los obtenidos de la curva p-y convergen. Esta deflexión está totalmente ligada a la reacción del suelo por las curvas p-y y el módulo de subrasante (E_{p-y}).

Para obtener una buena aproximación del perfil de deflexiones a lo largo del pilote, se deben definir bastante bien las propiedades del suelo y del pilote tales como ángulo de fricción interna (ϕ'), peso específico efectivo (γ'), espesores de los estratos, el tipo de curva p-y, el coeficiente de subrasante (K) y la rigidez a la flexión del pilote (EI). En arenas, una de las propiedades más sensitivas en dicha determinación es el coeficiente de subrasante K. Como vimos en el Capítulo 2, este coeficiente de subrasante no es un parámetro sensitivo en la determinación de momentos, pero sí en la determinación de deflexiones laterales del pilote. Este coeficiente se utiliza para calcular la pendiente inicial de las curvas p-y, la cual se asumió que varía lineal con la profundidad de la forma $E_{p-y} = K \cdot z$ (esta es una aproximación comúnmente utilizada en arenas). Para obtener el mejor ajuste del perfil de deflexiones con la profundidad, se trató de solo variar los valores de los coeficientes de subrasantes hasta que se obtuviera el mejor ajuste entre el perfil de deflexiones laterales medidas en las pruebas de carga y el computado. Es decir, los análisis no fueron predicciones de la respuesta del pilote sino ajustes de los resultados de campo, para luego utilizar los resultados del modelo que dio el mejor ajuste y así poder estudiar los valores de las reacciones del suelo generadas.

En esta sección se presentarán las propiedades del suelo y del pilote necesarias para obtener la mejor aproximación del perfil de deflexiones con la profundidad, también se presenta una comparación de las deflectadas para diferentes niveles de carga lateral obtenidas utilizando LPILE y las medidas en las pruebas de los 3 pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia

6.2.1. LPILE 5.0

LPILE 5.0 es un programa desarrollado por Ensoft, INC diseñado para analizar pilotes individuales bajo cargas laterales y es uno de los más utilizados en la práctica geotécnica actual.

Con este programa se puede obtener el perfil de deflexiones, la distribución de momentos, cortantes y reacciones del suelo. Para el análisis se requiere introducir propiedades del pilote tales como diámetro, longitud y EI el cual puede ser lineal o no lineal. Para el caso de EI no lineal, LPILE puede generar su propia relación de momento versus curvatura y EI versus momento para pilotes de materiales muy utilizados como acero y hormigón reforzado. LPILE también permite la introducción de cualquier tipo de relación del EI con los momentos aplicados.

El suelo es modelado con el uso de curvas p-y las cuales son generadas internamente por LPILE dado el tipo de curva p-y que se desea utilizar (se puede elegir entre algunas curvas p-y de la literatura), las propiedades del suelo y el diámetro del pilote. También LPILE permite introducir cualquier tipo de curva p-y de forma manual. Los parámetros del suelo utilizados por LPILE para cualquier análisis son el peso específico efectivo, el ángulo de fricción interna del suelo y el coeficiente de subrasante.

Las siguientes subsecciones presentan los resultados de modelar los 3 pilotes de prueba del caso histórico de Hampton, Virginia utilizando LPILE.

6.2.2. Análisis del pilote de hormigón pretensado

El pilote de prueba es en un pilote de sección transversal cuadrada de 0.61 m de diámetro y 18 m de longitud. Este pilote fue modelado utilizando una variación no lineal del EI con las cargas aplicadas mostrada en la Figura 5-3b. La rigidez a la flexión inicial de este pilote es $355,610 \text{ kN-m}^2$. Para el análisis se utilizó el mayor número de nodos permitido por LPILE igual a 301 nodos. Esta discretización en segmentos tan pequeños utiliza mas memoria de la computadora y por ende toma un poco más de tiempo para completar el análisis. La ventaja de discretizar el pilote en este número de nodos es que se obtiene mayor exactitud en los resultados.

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote de hormigón pretensado (PSC) con LPILE se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración simple (SPT) del barreno más cercano a este pilote. Estos valores de SPT pertenecientes al barreno ubicado al final del extremo sur son mostrados en la Figura 6-1, esta Figura también muestra las diferentes capas (4) utilizadas en el modelo. La primera capa es un

relleno puesto por el hombre aparentemente pobremente compactada, el tipo de suelo utilizado como rellenos fue una arena limosa. Luego de esta capa le sigue una capa de arena limosa medianamente densa la cual se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 10 m. Los próximos 10 m están formados por una combinación de arena limosa y arena arcillosa. El nivel freático se presenta a una profundidad de aproximadamente 2.4 m por debajo del nivel de la superficie.

La Tabla 6-1 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con LPILE.

Tabla 6-1. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PSC con LPILE.

Pilote de Prueba	Capa No.	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m³)	ϕ' (grados)	K (MN/m³)
PSC $EI_{inicial} = 3.56E5$ (kN - m²)	1	0.91	Arena	19.8	31	2.8
	2	1.5	Arena	10	30	1.7
	3	7.5	Arena	10	33	1.7
	4	10	Arena	11	35	1.7

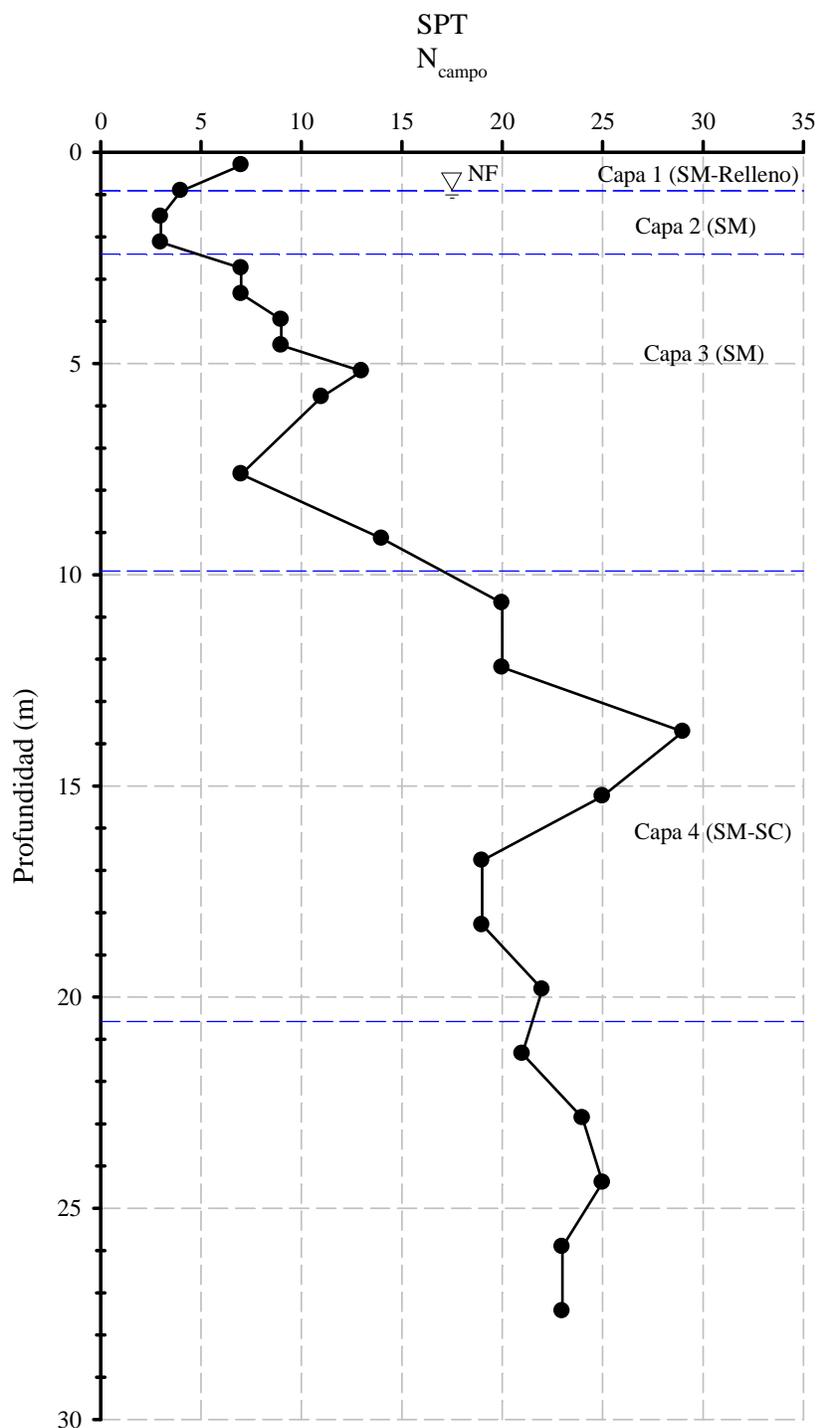


Figura 6-1. Variación del SPT con la profundidad para el barreno localizado en el extremo sur del sitio de prueba de Hampton, Virginia (adaptado de Pando 2003).

Como se mencionó anteriormente, las propiedades del suelo utilizadas en el análisis fueron determinadas utilizando correlaciones con el SPT, estos valores permanecieron fijos

durante el proceso de obtener los perfiles de deflexiones que más se ajustaran a lo medido. Lo único que se varió en el análisis fue el valor de K. Este valor de K fue variado hasta obtener el mejor ajuste o menor error entre el perfil de deflexiones medido y el perfil de deflexiones calculado. Los valores de K presentados en la Tabla 6-1 corresponden al mejor ajuste obtenido. Para éste caso se utilizaron curvas p-y de la literatura que vienen por defecto dentro de LPILE. Se utilizaron las curvas p-y de API (1987) para arenas por encima y por debajo del nivel freático.

El modelo utilizado para analizar este pilote consistió en un modelo de 4 capas de suelo. Las dos primeras capas fueron modeladas como arena suelta, las otras dos capas subsiguientes fueron modeladas como arena medianamente densa. Para este pilote el punto de aplicación de la carga se encontraba a 1.24 m medido desde la cabeza del pilote. Alrededor del pilote se realizó una excavación de 0.79 m bajo el nivel de la superficie del terreno. El modelo en LPILE toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote.

Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para diferentes niveles de carga lateral son mostradas en las Figuras 6-2, 6-3 y 6-4.

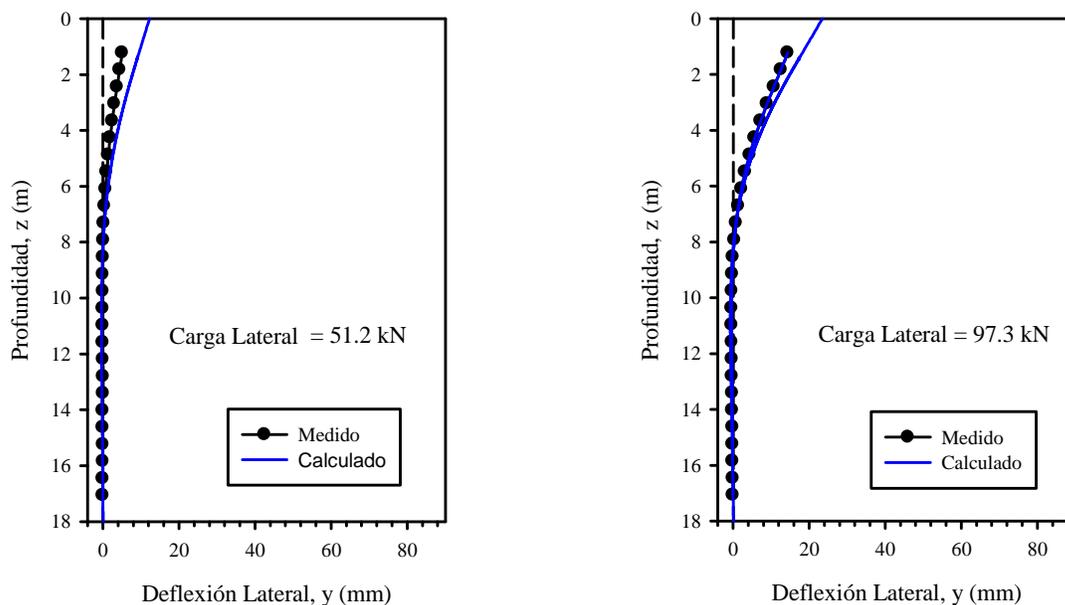


Figura 6-2. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales bajos.

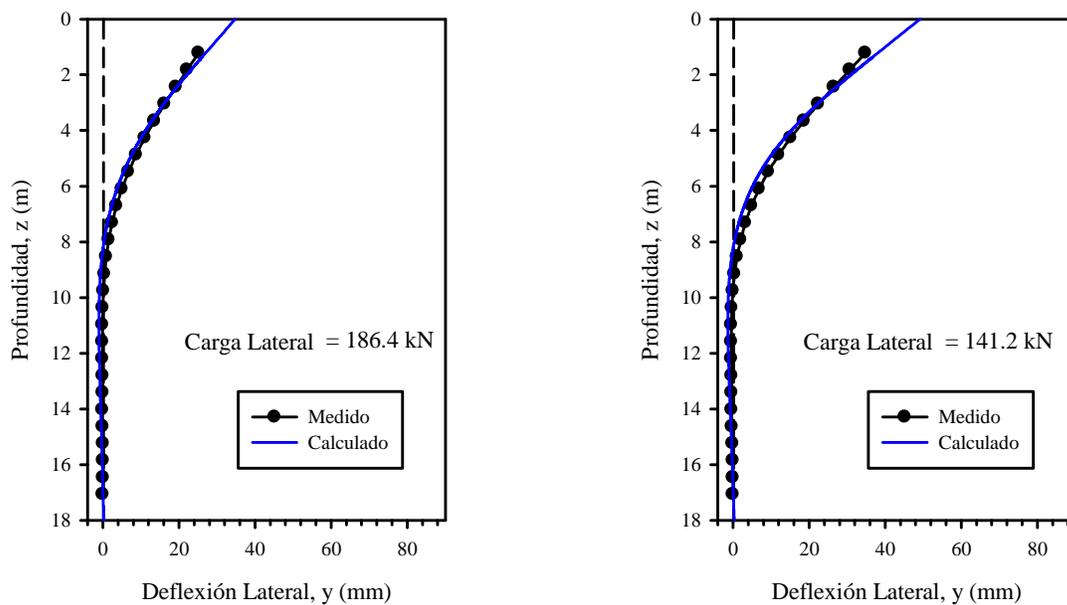


Figura 6-3. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales intermedios.

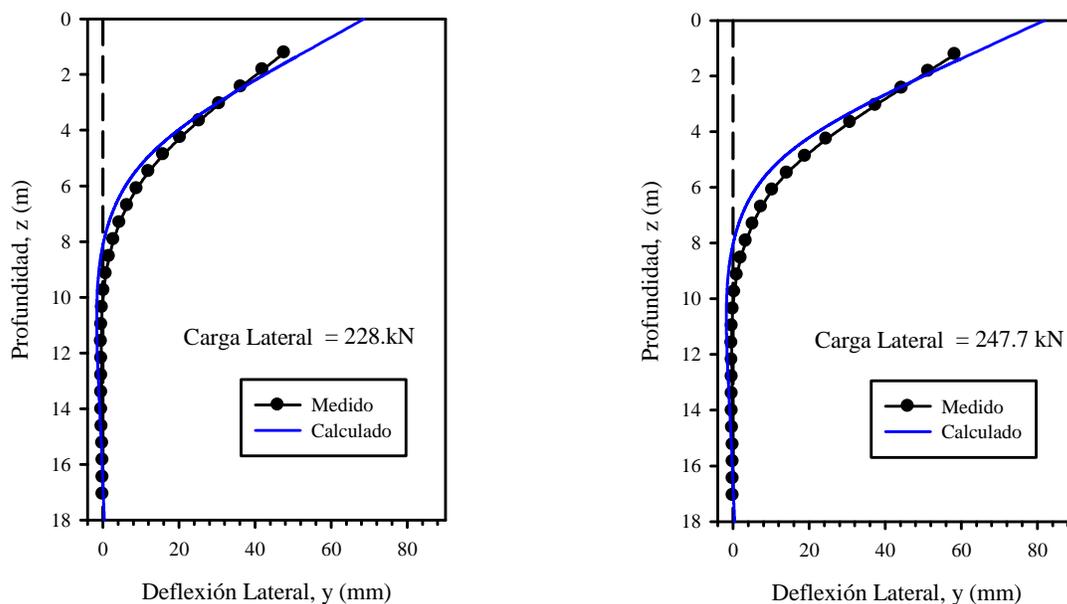


Figura 6-4. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales altos.

Para niveles bajos de carga lateral se aprecia una sobrepredicción de las deflexiones laterales a lo largo del pilote. Esto se puede deber a la forma de las curvas p-y utilizadas, las cuales a bajos niveles de carga lateral perciben mayores deflexiones del pilote. Por otro lado, se aprecia una buena predicción del punto de pivote del pilote. Para niveles de carga intermedios se aprecia una buena predicción del perfil de deflexiones laterales del pilote. En los primeros 2 m de profundidad se presenta una ligera sobrepredicción de las deflexiones laterales. Entre 4 y 8 m de profundidad se presenta una subpredicción de las deflexiones laterales. Para este nivel de cargas laterales la predicción del punto de pivote estuvo ligeramente por encima del presentado en las prueba de carga lateral. Para niveles de carga lateral altos se presenta una subpredicción de la mayor parte de las deflexiones laterales. Sobre los 2 m de profundidad se aprecia una sobrepredicción de las deflexiones laterales, para el resto del pilote es evidente una subpredicción de estas deflexiones laterales. La predicción de la ubicación del punto de pivote para estas cargas se presenta aproximadamente 0.75 m por encima de la ubicación obtenida en la prueba de carga. El cálculo del error entre los datos de deflexión lateral medidos y los calculados se presentan en la Tabla 6-2. El error fue calculado con la finalidad de saber con exactitud si se presenta sobrepredicción o subpredicción de cada punto de deflexión con la profundidad. Esta Tabla también presenta un promedio de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades que va desde 1.22 m hasta 6.71 m de profundidad, el cual consideramos es un rango de profundidades representativo para este pilote.

Tabla 6-2. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de PSC del tipo R = Medido/Calculado.

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 5	R Carga 6
1.22	0.54	0.79	0.93	0.91	0.91	0.93
1.83	0.54	0.81	0.96	0.94	0.94	0.97
2.44	0.55	0.82	0.99	0.98	0.98	1.02
3.05	0.55	0.83	1.02	1.01	1.03	1.09
3.66	0.55	0.84	1.05	1.06	1.09	1.17
4.27	0.54	0.85	1.10	1.11	1.17	1.27
4.88	0.55	0.86	1.16	1.19	1.28	1.40
5.49	0.54	0.87	1.23	1.28	1.41	1.56
6.10	0.56	0.89	1.35	1.42	1.61	1.81
6.71	0.59	0.93	1.55	1.64	1.98	2.28
7.32	0.66	1.02	2.03	2.15	2.85	3.53
7.92	1.12	1.49	4.15	4.58	8.72	17.44
8.53	-0.70	-0.10	-4.22	-3.36	-3.13	-2.98
9.14	-0.13	0.43	-0.76	-0.49	-0.74	-0.83
9.75	-0.10	0.51	-0.23	0.03	-0.17	-0.23
10.36	-0.04	0.54	0.00	0.22	0.09	0.03
10.97	-0.04	0.50	0.09	0.31	0.21	0.15
11.58	-0.04	0.45	0.12	0.32	0.26	0.19
12.19	-0.14	0.44	0.12	0.33	0.27	0.20
12.80	-0.27	0.39	0.06	0.32	0.28	0.19
13.41	-0.25	0.43	0.07	0.38	0.33	0.20
14.02	0.00	0.53	0.17	0.51	0.44	0.26
14.63	0.00	0.43	0.07	0.48	0.42	0.21
15.24	-0.30	0.39	-0.26	0.32	0.25	0.07
15.85	-0.52	0.54	-0.54	0.14	0.13	0.00
16.46	1.75	1.34	-1.19	0.71	0.50	0.56
17.07	0	0	0	0	0	0
Prom.	0.55	0.85	1.13	1.16	1.24	1.35
Min.	0.54	0.79	0.93	0.91	0.91	0.93
Max.	0.59	0.93	2.03	1.64	1.98	2.28
Desv. Est.	0.01	0.02	0.12	0.14	0.20	0.25

De acuerdo a la Tabla 6-2, en general, para niveles de carga bajos se presenta una sobrepredicción de las deflexiones laterales de aproximadamente 30% , una subpredicción de aproximadamente 15 % para los niveles de carga lateral intermedios y 30% para niveles de

cargas laterales altos. Para este pilote, a medida que aumentan las cargas los valores de deflexión lateral se van alejando cada vez más de la media.

Es de interés saber que también predice LPILE las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno. La Figura 6-5 muestra una comparación entre las deflexiones laterales al nivel de la superficie mediadas y calculadas. Para todos los niveles de carga lateral se aprecia una sobrepredicción de la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno lo cual concuerda con lo presentado anteriormente en las Figuras 6-2, 6-3 y 6-4 para cada nivel de carga lateral.

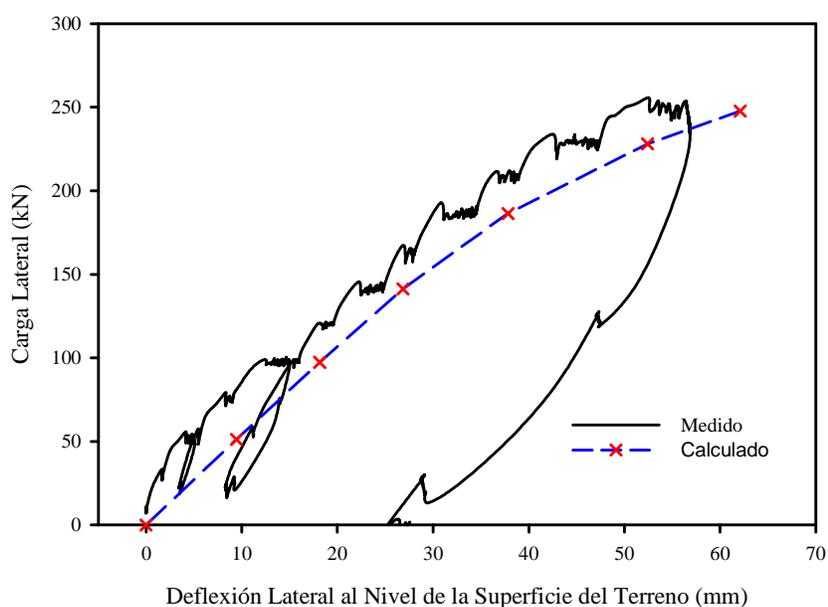


Figura 6-5. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PSC a diferentes niveles de carga lateral.

En general consideramos que la predicción de las deflexiones laterales para este pilote son aceptables para los fines de esta investigación. Por otro lado las curvas p-y utilizadas en el análisis no modelan tan bien el comportamiento de este pilote instalado en ese tipo de suelo. Quizás el hecho de que este pilote sea de sección transversal cuadrada repercuta de cierta forma en la predicción del comportamiento de este pilote bajos cargas laterales.

6.2.3. Análisis del pilote de FRP

El pilote de prueba es en un pilote de sección transversal circular de 0.62 m de diámetro y 18.3 m de longitud. Este pilote fue modelado utilizando una variación no lineal del EI con las cargas aplicadas mostrada en la Figura 5-3b. La rigidez a la flexión inicial de este pilote es $186,510 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$. Para el análisis se utilizó el mayor número de nodos permitido por LPILE igual a 301 nodos.

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote de tubo de Polímero reforzado con fibra y núcleo de hormigón (FRP) con LPILE se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración simple (SPT) del barreno más cercano a este pilote. Estos valores de SPT pertenecientes al barreno ubicado al final del extremo norte son mostrados en la Figura 6-6, esta Figura también muestra las diferentes capas (3) utilizadas en el modelo. La primera capa es un relleno puesto por el hombre aparentemente bien compactado, el tipo de suelo utilizado como rellenos fue una arena limosa. Luego de esta capa le sigue una capa de arena limosa medianamente densa la cual se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 10 m. Los próximos 10 m están formados por una combinación de arena limosa y arena arcillosa. El nivel freático se presenta a una profundidad de aproximadamente 1.2 m por debajo del nivel de la superficie. Este perfil de suelo es prácticamente idéntico al perfil de suelo cercano al pilote de hormigón pretensado. La única diferencia notable entre los dos perfiles de suelo se encuentra principalmente en los primeros 2.5 m de profundidad, donde esa porción del perfil de suelo perteneciente al pilote de FRP presenta ser más denso que esa misma porción del estrato del perfil de suelo para el pilote PSC.

La Tabla 6-3 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con LPILE.

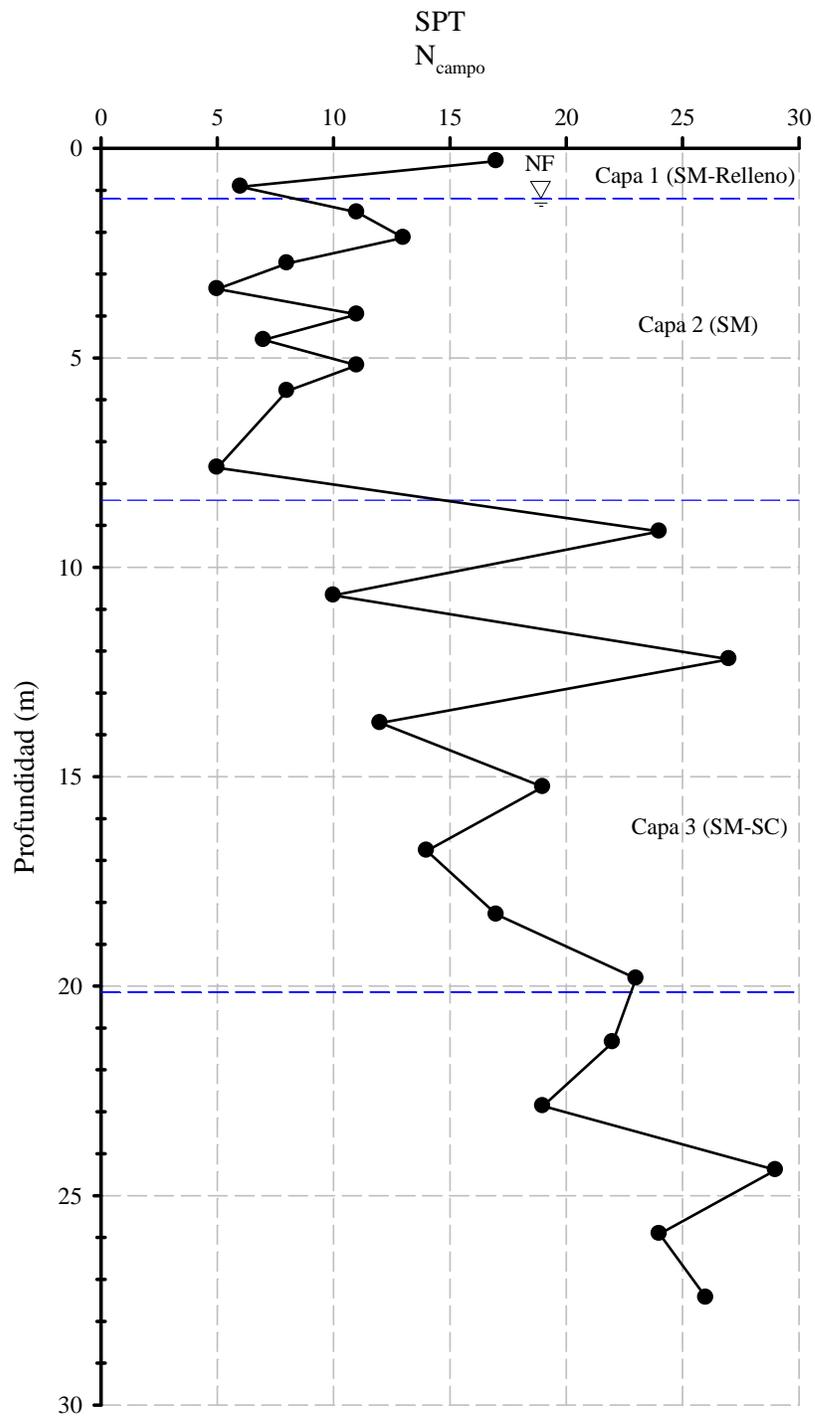


Figura 6-6. Variación del SPT con la profundidad para el barreno localizado en el extremo norte del sitio de prueba de Hampton, Virginia (adaptado de Pando 2003).

Tabla 6-3. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de FRP con LPILE.

Pilote de Prueba	Capa No.	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grados)	K (MN/m ³)
FRP $EI_{inicial} = 1.86E5$ (kN - m²)	1	1.2	Arena	19.8	34	9.07
	2	7.2	Arena	10	33	5.5
	3	11.6	Arena	11	35	5.5

Al igual que para el pilote de hormigón pretensado, los parámetros de resistencia del suelo determinados utilizando correlaciones con SPT permanecieron fijos durante el proceso de obtener las deflectadas que más se ajustaran a lo medido. Lo único que se varió en el análisis fue el valor de K. Los valores de K presentados en la Tabla 6-3 corresponden al mejor ajuste obtenido. Se utilizaron las curvas p-y de Reese et al. (1974) para arenas por encima y por debajo del nivel freático las cuales vienen por defecto dentro del programa LPILE.

El modelo utilizado para analizar este pilote consistió en un modelo de 3 capas de suelo. Las 3 capas fueron modeladas como arena medianamente densas con ligeros cambios en el ángulo de fricción interna del suelo. Para este pilote el punto de aplicación de la carga se encontraba a 0.79 m medido desde la cabeza del pilote. Alrededor del pilote se realizó una excavación de 1.06 m bajo el nivel de la superficie del terreno. El modelo en LPILE toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote.

Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para diferentes niveles de carga lateral son mostradas en las Figuras 6-7, 6-8 y 6-9.

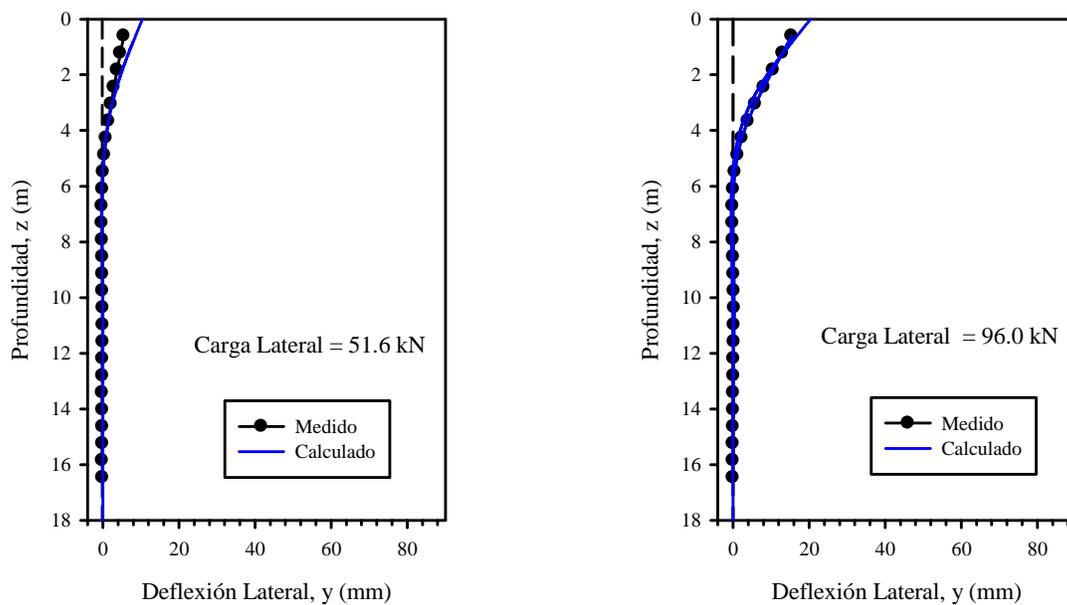


Figura 6-7. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales bajos.

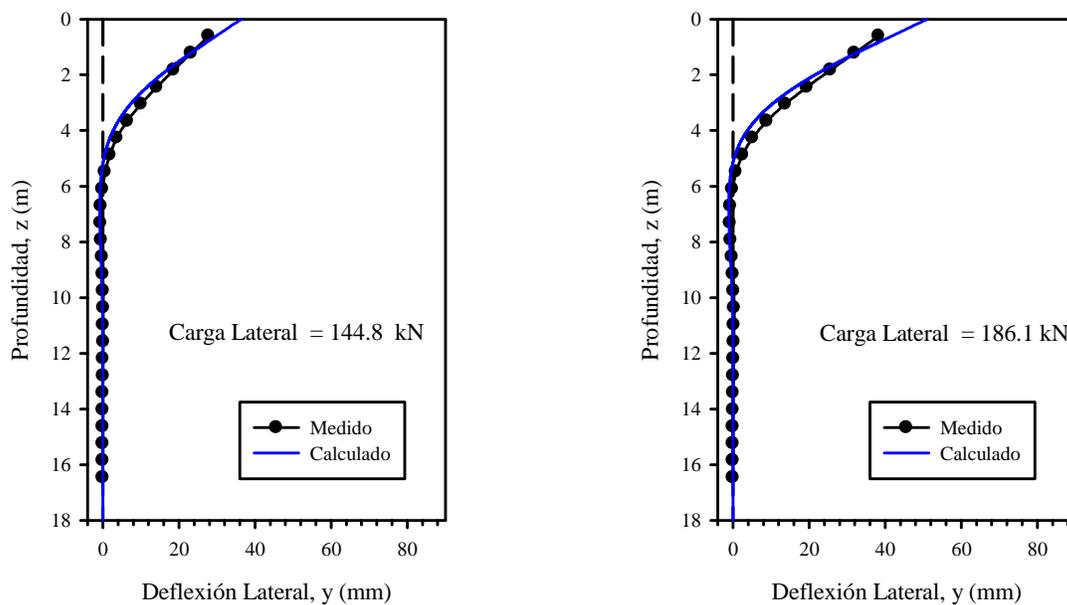


Figura 6-8. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales intermedios.

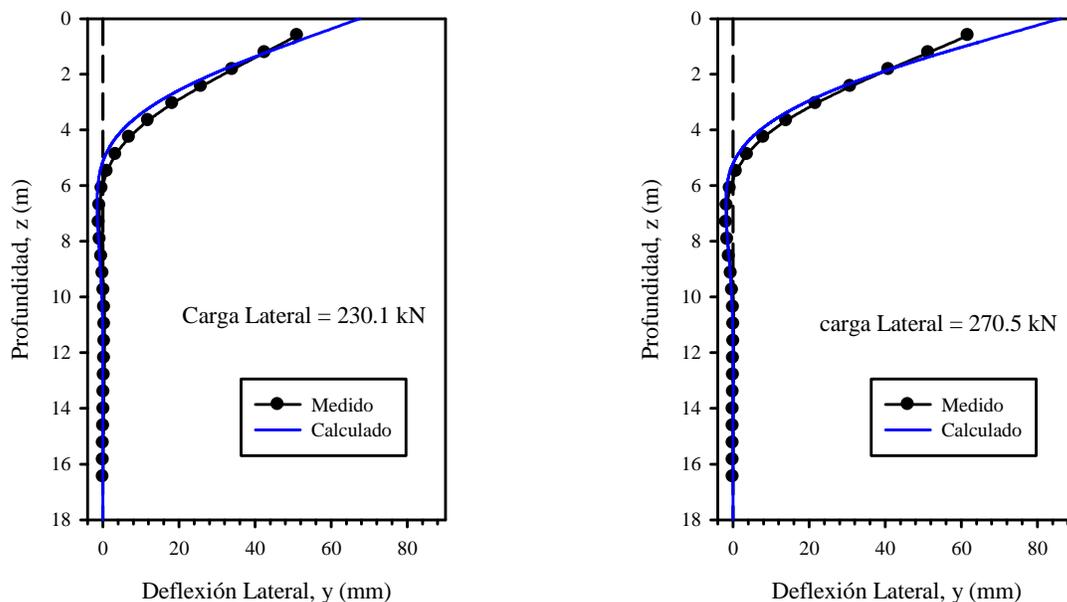


Figura 6-9. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales altos.

Para la carga lateral de 57.6 kN se aprecia una sobrepredicción de las deflexiones laterales a lo largo del pilote. Esto se puede deber a la forma de las curvas p-y utilizadas, las cuales a bajos niveles de carga lateral perciben mayores deflexiones del pilote. Para la carga lateral de 96.0 kN en general se aprecia una ligera subpredicción de la deflexión lateral a lo largo del pilote. Por otro lado, para niveles de carga bajos se aprecia una buena predicción del punto de pivote del pilote. Para niveles de carga intermedios, en los primeros 1.2 m de profundidad se presenta una ligera sobrepredicción de las deflexiones laterales. Para el resto del pilote se presenta una subpredicción de las deflexiones laterales. Para este nivel de cargas laterales la predicción del punto de pivote estuvo ligeramente por encima del presentado en las prueba de carga lateral. En el caso de cargas laterales altas, en los primeros 1.2 m de profundidad se aprecia una sobrepredicción de las deflexiones laterales (para la carga lateral de 230.1 kN). Para la carga lateral de 270.5 kN, en los primeros 1.8 m de profundidad se aprecia una sobrepredicción de las deflexiones laterales. Para ambas cargas laterales es evidente una subpredicción de las deflexiones laterales para el resto del pilote. La predicción de la ubicación del punto de pivote para estas cargas se presenta aproximadamente se encuentra ligeramente por encima de la ubicación obtenida en la prueba de carga. El cálculo del error entre los datos de deflexión lateral medidos y los calculados se presentan en la Tabla 6-4. Esta Tabla también presenta un promedio

de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades desde 0.61 m hasta 4.27 m de profundidad, el cual consideramos es un rango de profundidades representativo para este pilote.

Tabla 6-4. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de FRP del tipo R = Medido/Calculado.

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 5	R Carga 6
0.61	0.64	0.92	0.93	0.92	0.93	0.87
1.22	0.68	0.99	1.01	0.99	0.99	0.93
1.83	0.74	1.07	1.10	1.08	1.08	0.99
2.44	0.80	1.17	1.22	1.19	1.18	1.07
3.05	0.88	1.29	1.37	1.33	1.32	1.18
3.66	0.98	1.44	1.57	1.55	1.53	1.32
4.27	1.12	1.68	1.97	2.01	1.99	1.60
4.88	1.43	2.49	3.85	4.45	4.44	2.81
5.49	-2.49	-6.27	-2.05	-1.56	-1.52	-1.14
6.10	0.59	-0.23	0.13	0.17	0.17	0.46
6.71	0.82	0.20	0.61	0.59	0.57	0.83
7.32	0.75	0.23	0.69	0.70	0.69	0.98
7.92	0.67	0.03	0.61	0.62	0.65	1.02
8.53	0.54	-0.25	0.38	0.36	0.42	0.93
9.14	0.43	-0.77	0.08	-0.03	0.08	0.72
9.75	0.67	-1.48	-0.27	-0.59	-0.64	0.44
10.36	0.59	-3.12	-1.12	-1.92	-2.23	-0.46
10.97	1.95	-6.64	-2.45	-4.77	-6.87	-2.34
11.58	5.98	-27.91	-30.38	-883.17	90.43	35.91
12.19	-14.73	13.53	2.34	5.21	9.30	2.38
12.80	-9.51	7.64	2.12	3.07	6.60	1.37
13.41	-13.23	4.00	0.00	1.18	5.11	0.48
14.02	-13.49	4.60	0.00	1.43	5.53	0.29
14.63	-17.66	2.43	-1.70	0.00	5.63	-0.40
15.24	-26.02	0.00	-3.87	-2.02	5.60	-1.27
15.85	-49.33	0.00	-6.78	-5.41	7.25	-3.43
16.46	-46.17	0.00	-5.11	-4.27	10.72	-2.81
Prom.	0.83	1.22	1.31	1.29	1.29	1.14
Min.	0.64	0.92	0.93	0.92	0.93	0.87
Max.	1.12	1.68	1.97	2.01	1.99	1.60
Desv. Est.	0.08	0.13	0.17	0.18	0.18	0.12

De acuerdo a la Tabla 6-4, para la 51.6 kN se presenta una sobrepredicción de las deflexiones laterales de aproximadamente 17% y una subpredicción de aproximadamente 22 % para una carga lateral de 96 kN. Para niveles de carga lateral intermedios se obtuvo una subpredicción de las deflexiones laterales de aproximadamente un 30%. Para niveles de cargas laterales altos se presentó una subpredicción de 29% y 14% para las cargas de 230.1 y 270.5 kN respectivamente.

La Figura 6-10 muestra una comparación entre las deflexiones laterales al nivel de la superficie mediadas y calculadas. Con excepción de la primera carga lateral (51.6 kN), se aprecia una muy buena predicción de la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno para todos los otros niveles de carga lateral.

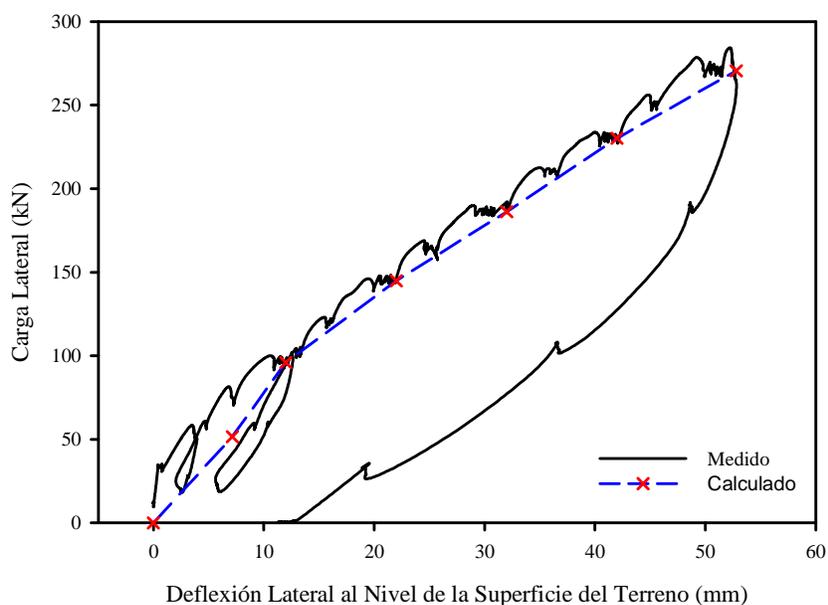


Figura 6-10. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de FRP a diferentes niveles de carga lateral.

Las predicciones del perfil de deflexiones a lo largo del pilote para los diferentes niveles de cargas laterales del pilote de FRP fueron bastante buenas y muy aceptables para los fines de esta investigación. Los parámetros del suelo y las curvas p-y seleccionadas para este pilote arraigaron en muy buenas predicciones de la mayoría de las formas deflectadas.

6.2.4. Análisis del pilote de plástico reciclado

El pilote de prueba es en un pilote de sección transversal circular de 0.59 m de diámetro y 18.3 m de longitud. Este pilote fue modelado utilizando una variación no lineal del EI con las cargas aplicadas mostrada en la Figura 5-3b. La rigidez a la flexión inicial de este pilote es 71,705 kN-m². Para el análisis se utilizó el mayor número de nodos permitido por LPILE igual a 301 nodos

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote de plástico reciclado (PPI) con LPILE se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración simple (SPT) del barreno más cercano a este pilote. Estos valores de SPT pertenecientes al barreno ubicado al final del extremo sur son mostrados en la Figura 6-1. Este barreno es exactamente el mismo utilizado para modelar el suelo del pilote PSC, por esto la descripción de cada estrato o capa utilizada en el análisis es la misma que se dio en la sección 6.2.2. Se decidió utilizar este barreno por ser el más cercano a la zona donde se encuentra instalado el este pilote.

La Tabla 6-5 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con LPILE.

Tabla 6-5. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PPI con LPILE.

Pilote de Prueba	Capa No.	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grados)	K (MN/m ³)
PPI $EI_{\text{inicial}} = 7.17E4$ (kN - m ²)	1	0.91	Arena	19.8	33	3.6
	2	1.5	Arena	10	30	2.2
	3	7.5	Arena	10	33	2.2
	4	10	Arena	11	35	2.2

Se puede notar de esta Tabla que se utilizaron la misma cantidad de capas, espesores y pesos específicos utilizados en el análisis del pilote PSC, lo único que varió fue el ángulo de fricción interna de la primera capa y por supuesto los valores del coeficiente de subrasante. Se siguió el mismo procedimiento de los otros pilotes para llegar al mejor estimado de las deflexiones laterales a lo largo del pilote, esto es, mantener todas las propiedades del suelo

intactas y solo variar el valor de K hasta obtener la mejor aproximación posible de las deflectadas. Los valores de K mostrados en la esta Tabla pertenecen a la mejor predicción.

Para este pilote el punto de aplicación de la carga se encontraba a 1.21 m medido desde la cabeza del pilote. Alrededor del pilote se realizó una excavación de 0.72 m bajo el nivel de la superficie del terreno. El modelo en LPILE toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote.

Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote y el mejor ajuste calculado con LPILE para diferentes niveles de carga lateral son mostradas en las Figuras 6-11, 6-12 y 6-13.

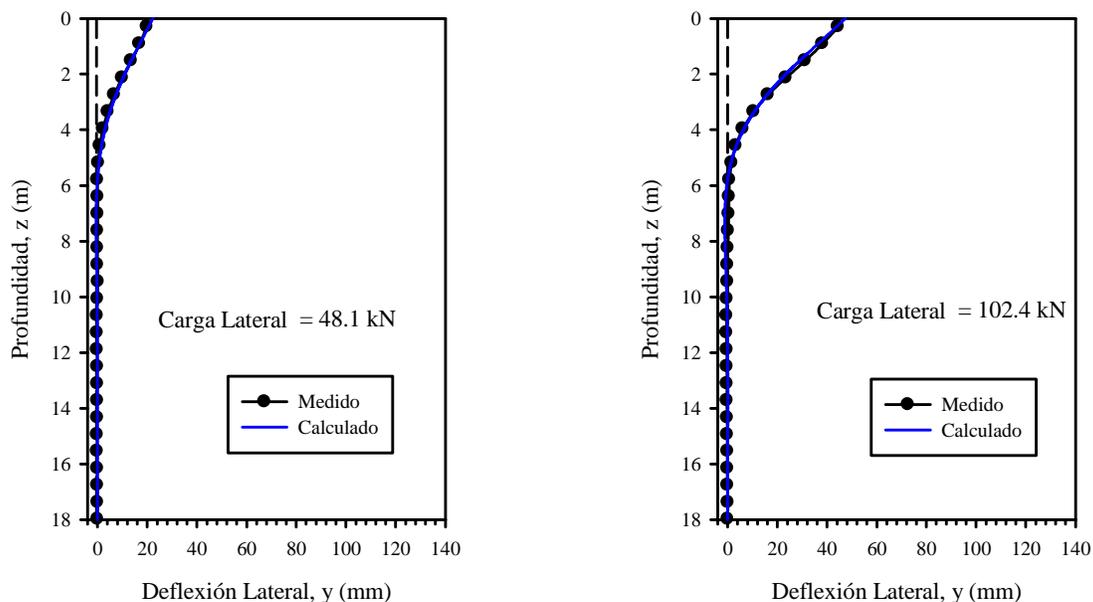


Figura 6-11. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales bajos.

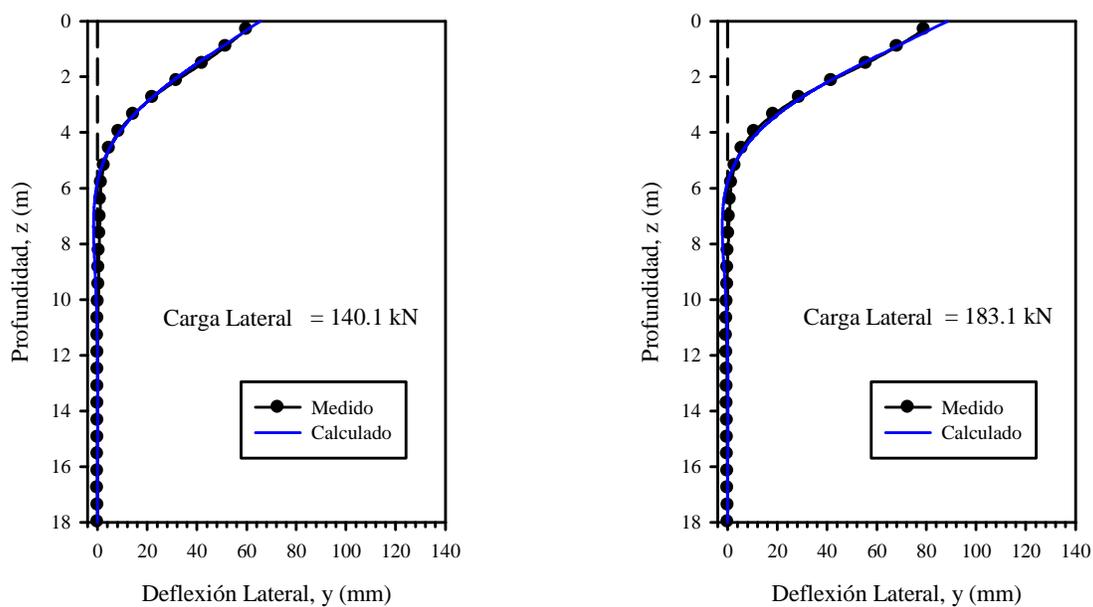


Figura 6-12. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales intermedios.

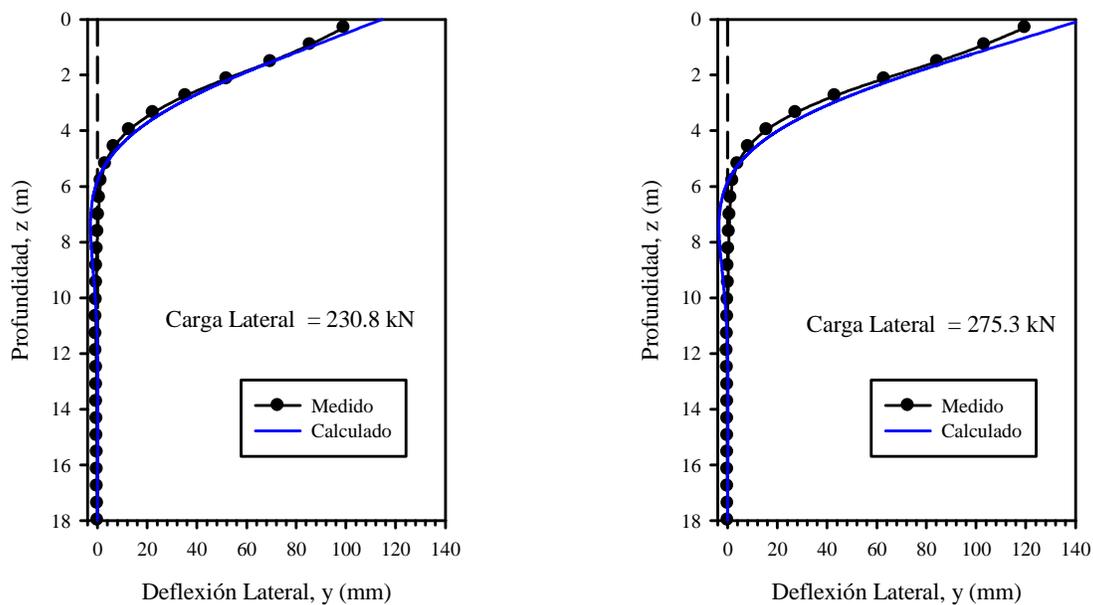


Figura 6-13. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales altos.

Para los niveles de carga lateral bajos e intermedios se presenta una predicción casi exacta de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote. Para las cargas laterales altas se presenta una ligera sobrepredicción de las deflexiones laterales a lo largo del pilote. En general se aprecia una predicción casi exacta, esto quiere decir que las propiedades del suelo, del pilote y las curvas p-y son exactamente las indicadas para modelar este pilote con LPILE. El cálculo del error entre los datos de deflexiones laterales medidas y los calculados se presentan en la Tabla 6-6. Esta Tabla también presenta un promedio de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades desde 0.3 m hasta 5.18 m de profundidad, el cual consideramos es un rango de profundidades representativo para este pilote.

De acuerdo a la Tabla 6-6, en general se pudo obtener una muy buena predicción del perfil de deflexiones. Con excepción de la primera y la última carga lateral (48.1 kN y 275.3 kN respectivamente) para todas las otras se obtuvo un error promedio menor al 10%. Para la primera y la última carga lateral se obtuvo en promedio una sobrepredicción de 18% y 14% respectivamente. Según la desviación estándar, las deflexiones obtenidas están bastante cercanas de la media, lo que quiere decir que el error calculado fue bastante consistente con la profundidad.

La Figura 6-14 muestra una comparación entre las deflexiones laterales al nivel de la superficie medidas y calculadas. Con excepción de la última carga lateral (275.3 kN), se aprecia una muy buena predicción de la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno para todos los otros niveles de carga lateral.

Tabla 6-6. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con LPILE para el pilote de PPI del tipo R = Medido/Calculado.

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 5	R Carga 6
0.3	0.97	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90
0.91	0.99	1.05	1.03	1.00	0.97	0.93
1.52	0.99	1.08	1.05	1.03	0.99	0.95
2.13	0.97	1.07	1.04	1.01	0.97	0.93
2.74	0.90	1.02	1.01	0.96	0.91	0.88
3.35	0.83	0.98	0.97	0.91	0.85	0.82
3.96	0.71	0.92	0.94	0.86	0.79	0.75
4.57	0.58	0.93	0.98	0.86	0.76	0.72
5.18	0.45	1.21	1.41	1.14	0.92	0.88
5.79	2.52	-11.81	-19.21	-37.16	131.08	7.71
6.4	-0.10	-0.68	-1.02	-0.66	-0.39	-0.54
7.01	-0.17	-0.38	-0.62	-0.31	-0.13	-0.25
7.62	-0.04	-0.20	-0.49	-0.17	-0.01	-0.16
8.23	-0.05	-0.06	-0.43	-0.06	0.10	-0.11
8.84	0.00	0.12	-0.41	0.09	0.23	-0.06
9.45	-0.60	0.09	-0.61	0.13	0.30	-0.11
10.06	0.10	0.70	-0.49	0.42	0.65	-0.03
10.67	1.69	1.94	-0.30	1.13	1.42	0.16
11.28	5.94	5.15	0.09	3.06	3.40	0.64
11.89	28.97	22.48	-1.87	11.47	13.38	4.53
12.5	-12.25	-12.16	2.63	-7.66	-7.83	-2.74
13.11	-6.16	-6.37	0.96	-3.84	-4.01	-1.14
13.72	-6.57	-6.60	0.55	-3.40	-3.65	-0.92
14.33	-7.94	-5.91	0.64	-3.12	-3.86	-0.92
14.94	-11.92	-5.50	1.13	-2.89	-4.44	-1.26
15.54	-18.25	-7.60	-0.84	-4.34	-5.41	-2.28
16.15	-20.43	-7.98	0.00	-4.14	-7.61	-2.93
16.76	-42.30	-17.17	-7.73	-6.58	-14.17	-7.03
17.37	18.86	32.92	39.11	17.01	-13.21	3.00
17.98	0	0	0	0	0	0
Prom	0.82	1.03	1.05	0.97	0.90	0.86
Min	0.58	0.92	0.94	0.86	0.76	0.72
Max	0.99	1.21	1.41	1.14	0.99	0.95
Desv Estan	0.10	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04

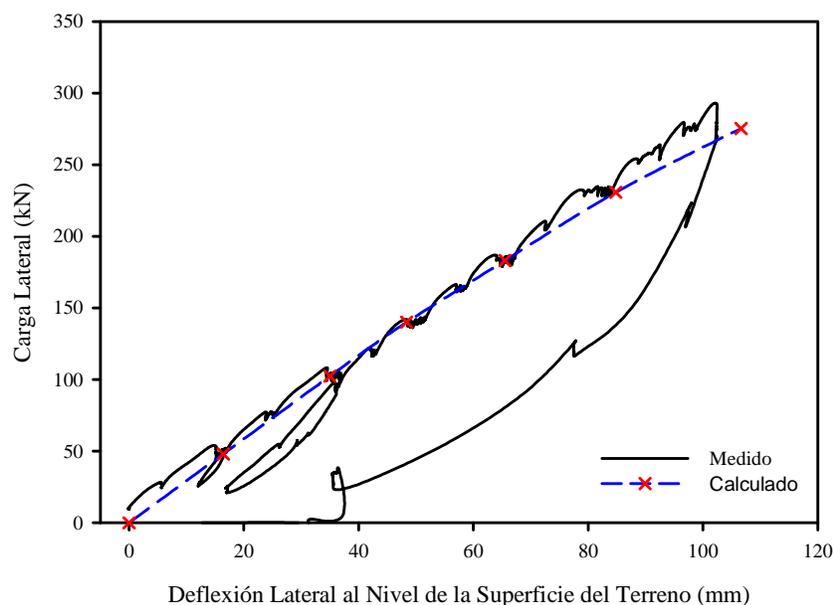


Figura 6-14. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con LPILE para el pilote de PPI a diferentes niveles de carga lateral.

Para este pilote se pudo obtener una excelente predicción de las deflexiones laterales y del punto de pivote para la mayoría de las deflectadas. De los tres pilotes analizados, este fue el que presentó menor error en las predicciones y el que se pudo modelar mejor con LPILE. De todas formas, en términos generales LPILE pudo predecir bastante bien el comportamiento a la flexión de los 3 pilotes cuando estos son sometidos a cargas laterales. Es bueno recalcar que para que se pudieran alcanzar estos resultados, el coeficiente de subrasante tuvo que ser modificado hasta alcanzar el mejor ajuste. Al modificar el coeficiente de subrasante (K) de alguna forma se están modificando las curvas $p-y$. Las curvas $p-y$ a diferentes para cada pilote a diferentes profundidades determinadas con LPILE serán presentadas en la sección 6.4 de este capítulo.

6.3. Análisis utilizando SWM basado en MCD

Al igual que en la sección anterior, se desea obtener una buena aproximación de las reacciones del suelo representadas por las curvas $p-y$ utilizando el método de la cuña de deformación (MCD). Para esto es necesario obtener una buena aproximación del perfil de

deflexiones a lo largo del pilote. La forma de llegar a una solución del problema de pilotes cargados lateralmente utilizando el MCD es bien similar al de la metodología de las curvas p-y. Este método funciona de forma iterativa donde, utilizando la variación del módulo de subrasante (E_{p-y}) con la profundidad obtenida realizando un análisis de estabilidad interna de cada sub-estrato con el MCD, se realiza un análisis de estabilidad global y se resuelve la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente. El proceso iterativo termina cuando se obtienen las mismas dimensiones de la cuña pasiva (profundidad y cantidad de deflexión a lo largo del pilote) obtenidas al resolver la ecuación diferencial y las obtenidas por el MCD. De igual forma que en el método de las curvas p-y, la reacción del suelo está ligada a este módulo de subrasante E_{p-y} .

Para obtener una buena aproximación del perfil de deflexiones a lo largo del pilote, se deben definir bastante bien las propiedades del suelo y del pilote tales como ángulo de fricción interna (ϕ'), peso específico efectivo (γ'), espesores de los estratos, la deformación al 50% del esfuerzo desviador de falla de un ensayo triaxial, la forma de la sección transversal del pilote y la rigidez a la flexión del pilote (EI). Para obtener el mejor ajuste del perfil de deflexiones a lo largo del pilote utilizando este programa, se variaron las propiedades siendo consistentes con lo obtenido en los ensayos de campo (SPT y CPT).

Como se ha mencionado anteriormente en esta tesis, el MCD no necesita el uso de curvas p-y en el proceso de resolución del problema. Éste es capaz de determinar sus propias curvas p-y las cuales toman en cuenta las propiedades del suelo y del pilote como la forma de la sección transversal, EI , nivel de esfuerzos y continuidad del suelo.

En esta sección se presentarán las propiedades del suelo y del pilote necesarias para obtener la mejor aproximación del perfil de deflexiones con la profundidad, también se presenta una comparación de las formas deflectadas para diferentes niveles de carga lateral obtenidas utilizando el programa SWM y las medidas en las pruebas de los 3 pilotes del caso histórico de Hampton, Virginia.

6.3.1. Análisis del pilote de hormigón pretensado

La descripción de este pilote es la misma descrita en la sección 6.2.1. A diferencia de LPILE que subdivide el pilote en nodos, SWM subdivide los estratos de suelo en sub-estratos y efectúa los análisis de estabilidad interna para el centro de cada uno de los sub-estratos. Para modelar este pilote con SWM se utilizó una subdivisión entre 100 sub-estratos. Se realizaron análisis aumentando la cantidad en que se dividían los estratos y no se notó ninguna diferencia en los resultados. Por esto una división de 100 sub-estratos es aceptable para los fines de esta investigación.

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote de hormigón pretensado (PSC) con SWM se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración simple (SPT) del barreno más cercano a este pilote (Figura 6-1). La Tabla 6-7 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con SWM.

Tabla 6-7. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PSC con SWM.

Pilote de Prueba	Capa No.	Espesor de Capa (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grados)	ϵ_{50} (deformación)
PSC $EI_{\text{total}} = 3.56E5$ (kN - m ²)	1	0.91	Arena	19.8	31	0.04
	2	1.5	Arena	10	27	0.07
	3	7.5	Arena	10	33	0.04
	4	10	Arena	11	35	Por Defecto

El número de capas, los espesores de cada capa, el tipo de suelo, los pesos específicos para cada capa y los ángulos de fricción interna para las capas 1, 3 y 4 son los mismos que se utilizaron en el análisis con LPILE. El único parámetro común que varió fue el ángulo de fricción interna de la capa No. 2, el cual se escogió el menor valor calculado de las correlaciones utilizadas, para así poder incorporar mayor cantidad de deflexión al nivel de la superficie del terreno. Los valores de ϵ_{50} para las primeras 3 capas de este modelo tuvieron que ser modificados para poder proporcionar un poco más de flexibilidad a los estratos más someros. Estos valores están un poco fuera del rango recomendado para este tipo de suelo, pero, modificar

este parámetro era la única forma de poder captar el hecho de que esos estratos en la realidad permiten mayor cantidad de deflexión lateral, posiblemente debido a la forma y arreglo de los granos, el grado de densificación, ó si este relleno está densificado por el lado húmedo de la curva de compactación. Para la capa No. 4, este valor se dejó por defecto el cual el programa SWM lo calcula internamente utilizando una ecuación que toma en cuenta las propiedades del suelo y el nivel de esfuerzos verticales efectivos. Para este estrato no fue necesario variar este parámetro ya que esta no se encuentra dentro de la zona de la cuña pasiva y no tiene gran influencia en la cantidad de deflexión lateral del pilote.

El modelo para este pilote toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote. Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para diferentes niveles de carga lateral son mostradas en las Figuras 6-15, 6-16 y 6-17.

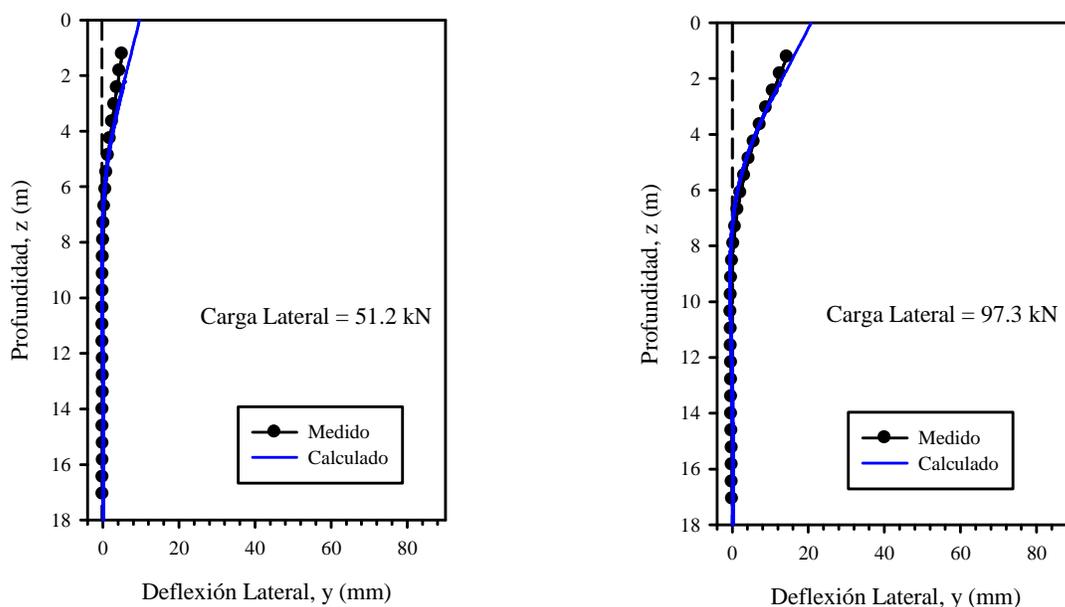


Figura 6-15. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales bajas.

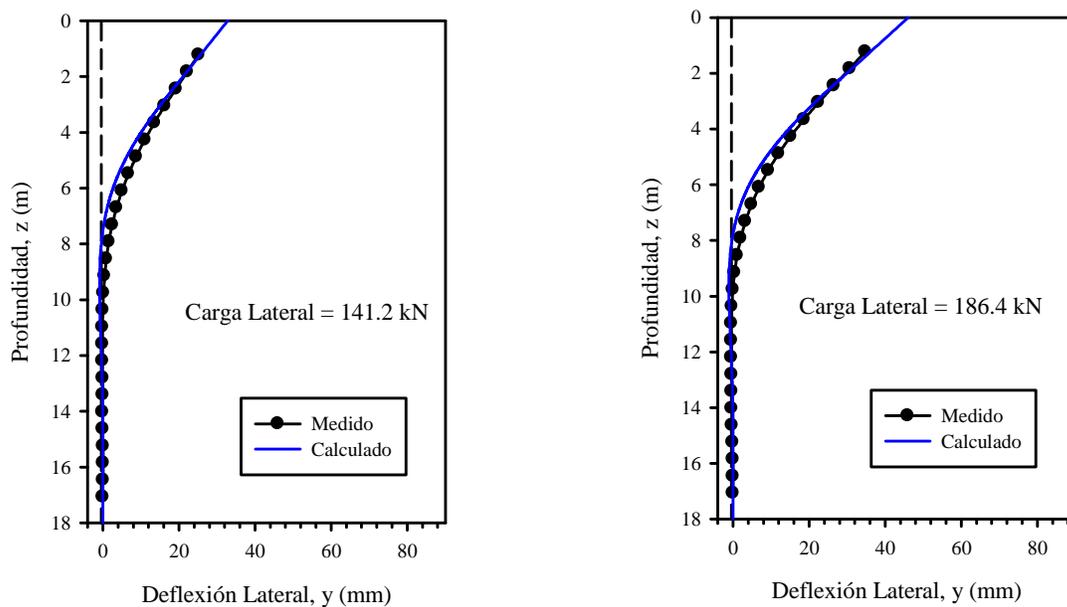


Figura 6-16. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales intermedios.

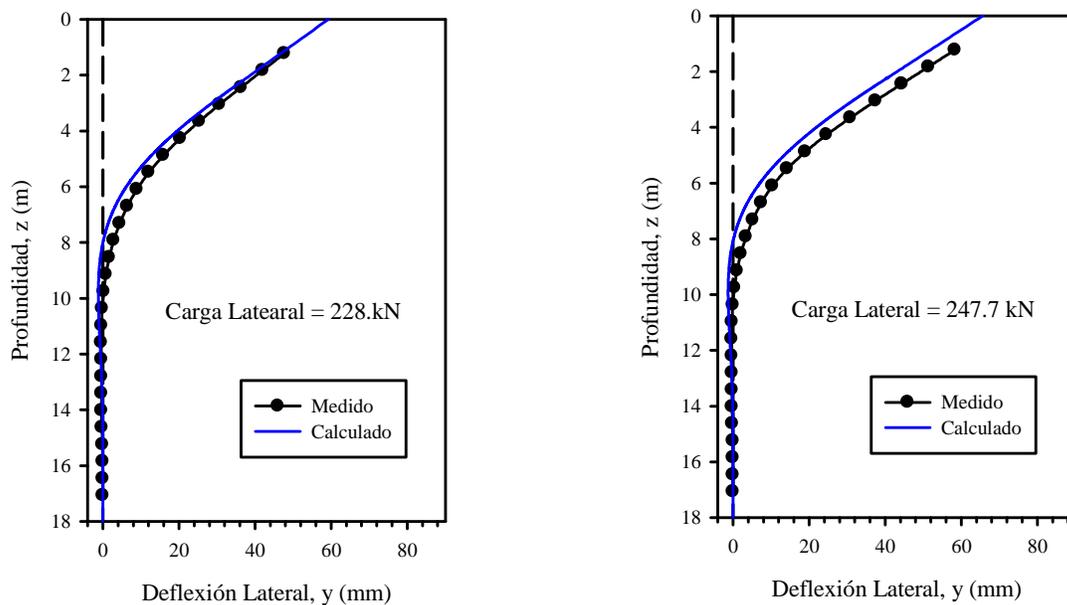


Figura 6-17. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a niveles de cargas laterales altos.

Para niveles bajos de carga lateral se aprecia una pequeña sobrepredicción de las deflexiones laterales en los primeros 3 m de profundidad. Por otro lado, se aprecia una buena predicción del punto de pivote del pilote. Para niveles de carga intermedios se aprecia una buena predicción en los primeros 3 m de profundidad y una subpredicción de las deflexiones laterales para el resto de la longitud del pilote. Para este nivel de cargas laterales la predicción del punto de pivote estuvo ligeramente por encima del presentado en las prueba de carga lateral. Para niveles de cargas laterales altos se presenta una subpredicción de la mayor parte de las deflexiones laterales. Para la carga lateral de 247.7 kN se aprecia una subpredicción del perfil de deflexiones a lo largo de toda la longitud del pilote. La predicción de la ubicación del punto de pivote para estas cargas se presenta aproximadamente 1m por encima de la ubicación obtenida en la prueba de carga. El cálculo del error entre los datos de deflexión lateral medidos y los calculados se presentan en la Tabla 6-8. Esta Tabla también presenta un promedio de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades que va desde 1.22 m hasta una profundidad variable dependiendo del nivel de carga lateral. Para la carga lateral de 51.2 kN la última profundidad del rango utilizado fue de 4.88 m, para las de 97.3 y 141.2 kN se promedió hasta 6.10 m y para el resto de las cargas laterales se promedió hasta 6.71 m. Estos rangos se utilizaron variables para poder obtener un promedio representativo de cada caso en particular. Para los valores máximos, mínimos y la desviación estándar se utilizaron los mismos rangos de profundidades que se utilizaron para obtener los promedios.

De esta Tabla se puede apreciar que para la carga lateral de 51.2 kN se obtuvo una sobrepredicción de aproximadamente 21% y una predicción casi perfecta para la de 97.3 kN. Para el resto de las cargas laterales se obtuvo una subpredicción de las deflexiones laterales de entre 27 y 34 %. Para este pilote, las deflexiones laterales obtenidas están un poco alejadas de la media lo que indica que no hay mucha consistencia en el error determinado punto a punto a lo largo del pilote.

Tabla 6-8. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de PSC del tipo R = Medido/Calculado

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 5	R Carga 6
1.22	0.68	0.89	0.98	0.96	1.01	1.12
1.83	0.70	0.91	1.00	0.98	1.03	1.14
2.44	0.72	0.94	1.04	1.01	1.06	1.16
3.05	0.75	0.98	1.08	1.04	1.09	1.19
3.66	0.80	1.03	1.15	1.10	1.13	1.23
4.27	0.87	1.10	1.25	1.17	1.17	1.26
4.88	1.01	1.22	1.40	1.28	1.25	1.32
5.49	1.27	1.43	1.63	1.45	1.36	1.41
6.10	2.04	1.86	2.07	1.74	1.57	1.58
6.71	14.49	3.31	3.15	2.36	2.00	1.97
7.32	-1.54	-9.32	10.50	4.61	3.20	3.05
7.92	-0.46	-0.88	-4.41	-10.45	20.53	12.24
8.53	-0.17	-0.03	-1.34	-1.48	-2.63	-3.33
9.14	-0.08	0.28	-0.56	-0.41	-0.78	-0.95
9.75	-0.09	0.49	-0.23	0.03	-0.20	-0.28
10.36	-0.05	0.67	0.00	0.29	0.12	0.04
10.97	-0.07	0.79	0.14	0.49	0.34	0.24
11.58	-0.10	0.93	0.26	0.65	0.52	0.39
12.19	-0.44	1.25	0.33	0.92	0.73	0.53
12.80	-1.28	1.63	0.24	1.29	1.10	0.70
13.41	-2.12	2.94	0.46	2.45	1.98	1.14
14.02	0.00	7.28	2.22	6.43	5.08	2.87
14.63	0.00	21.37	3.37	19.64	14.40	6.82
15.24	14.22	-23.38	16.71	-21.48	-19.43	-5.19
15.85	11.52	-11.13	11.29	-2.81	-2.58	0.00
16.46	-14.77	-9.40	8.33	-4.54	-2.78	-2.52
17.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prom.	0.79	1.06	1.29	1.31	1.27	1.34
Min.	0.68	0.89	0.98	0.96	1.01	1.12
Max.	1.01	1.86	2.07	2.36	2.00	1.97
Desv. Est.	0.06	0.18	0.20	0.26	0.18	0.16

La deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno se muestra en la Figura 6-18. Se presenta una buena predicción de la deflexión al nivel de la superficie del terreno para cada nivel de carga lateral. Para todas las cargas laterales con excepción de la última (247.7 kN) las predicciones al nivel de la superficie del terreno con el SWM son un poco conservadoras, lo que está bien desde el punto de vista práctico.

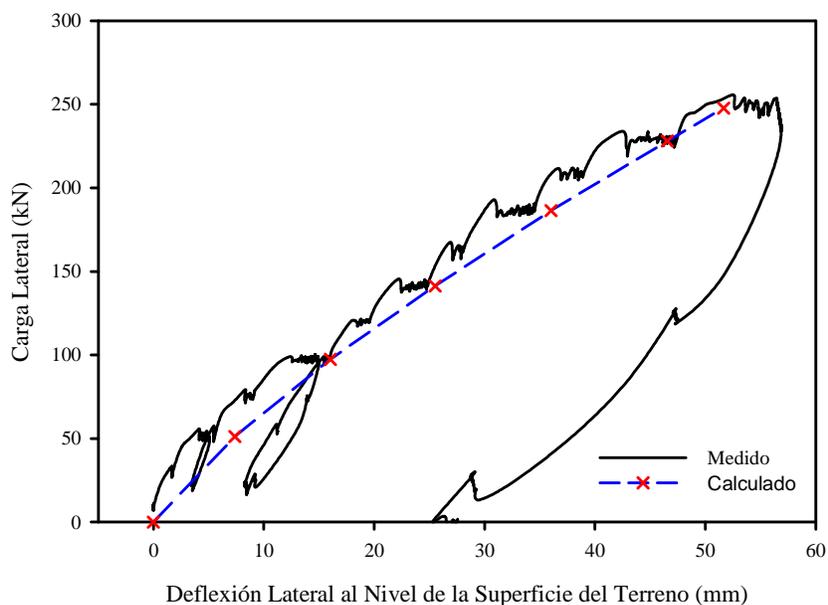


Figura 6-18. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PSC a diferentes niveles de carga lateral.

El SWM para este pilote de prueba predice un comportamiento un poco más rígido de lo que realmente es, sin embargo, en términos generales las predicciones del perfil de deflexiones con la profundidad fueron buenas y validas para los fines de esta investigación.

6.3.2. Análisis del pilote de FRP

La descripción de este pilote es la misma descrita en la sección 6.2.2. Para modelar este pilote con SWM se utilizó una subdivisión entre 100 sub-estratos. Se realizaron análisis aumentando la cantidad en que se dividían los estratos y no se notó ninguna diferencia en los resultados. Por esto una división de 100 sub-estratos es aceptable para los fines de esta investigación.

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote de tubo de Polietileno reforzado con fibra y núcleo de hormigón (FRP) con SWM se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración simple (SPT) del barrenado más cercano a este pilote (Figura 6-6.). La Tabla 6-9 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con SWM.

Tabla 6-9. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de FRP con SWM.

Pilote de Prueba	Capa No.	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grados)	ϵ_{50} (deformación)
FRP $EI_{\text{metal}} = 1.86E5$ (kN - m ²)	1	1.2	Arena	19.8	33	Por Defecto
	2	7.2	Arena	10	33	Por Defecto
	3	11.6	Arena	11	34	Por Defecto

El número de capas, los espesores de cada capa, el tipo de suelo, los pesos específicos para cada capa y los ángulos de fricción interna para la capa 2 son los mismos que se utilizaron en el análisis con LPILE. El único parámetro común que varió fue el ángulo de fricción interna de las capas 1 y 3, el cual se escogió el menor valor calculado de las correlaciones utilizadas. Los valores de ϵ_{50} por defecto son calculados internamente por el SWM por una ecuación que toma en cuenta las propiedades del suelo y el nivel de esfuerzos verticales efectivos..

El modelo para este pilote toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote. Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para diferentes niveles de cargas laterales son mostrados en las Figuras 6-19, 6-20 y 6-21.

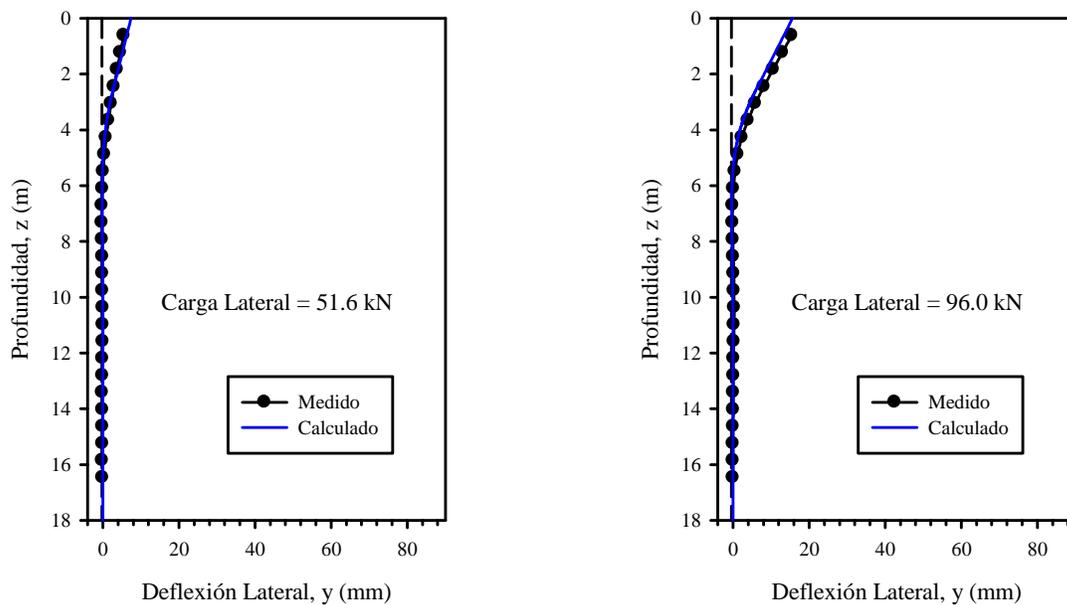


Figura 6-19. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales bajas.

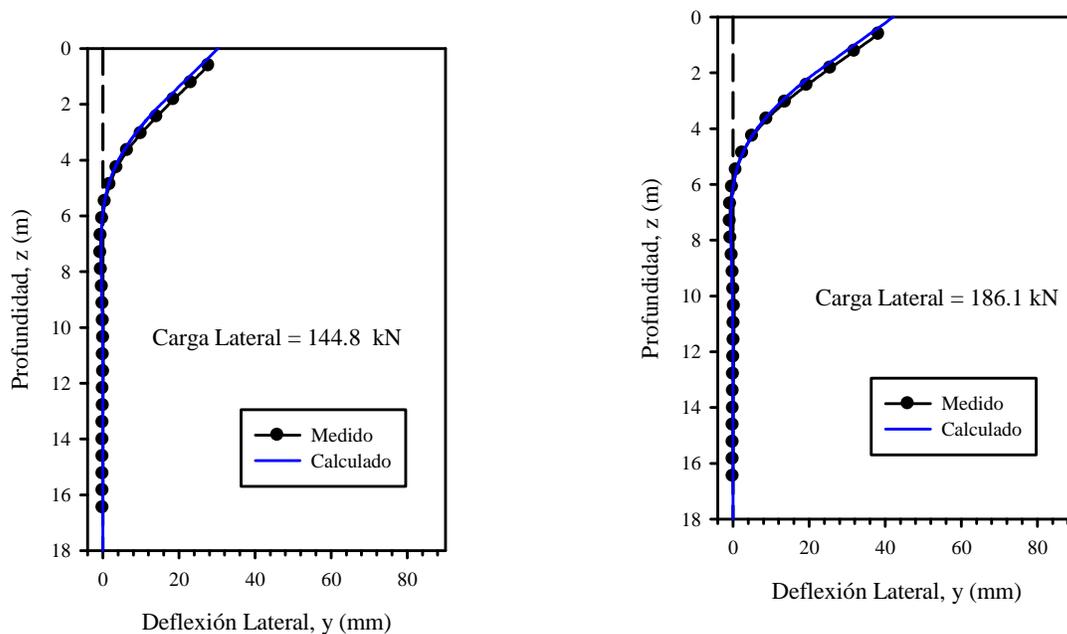


Figura 6-20. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales intermedios.

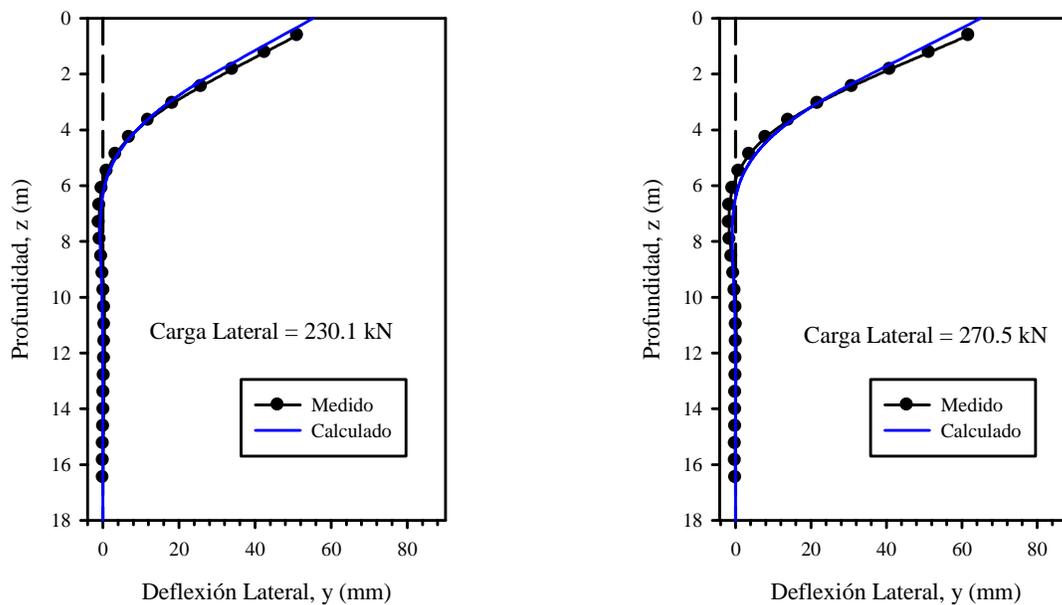


Figura 6-21. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a niveles de cargas laterales altos.

Para niveles bajos de carga lateral se aprecia muy buena predicción y una subpredicción del perfil de deflexiones a lo largo del pilote para las cargas laterales de 51.6 y 96 kN respectivamente. Para estas cargas bajas, el punto de cero deflexión también estuvo bien determinado por SWM. Para niveles de carga intermedios, en los primeros 3 m de profundidad se aprecia una subpredicción de las deflexiones laterales, para el resto de la longitud del pilote se presenta una excelente predicción de las mismas. Para este nivel de cargas laterales, el punto de cero deflexión lateral también se predijo con bastante exactitud. Para niveles de cargas laterales altos se presenta una subpredicción en los primeros 2.5 y 3 m de profundidad para las cargas laterales de 270.5 y 230.1 kN respectivamente. A diferencia del caso de la carga lateral de 230.1 kN donde para el resto del pilote se obtuvo una predicción bastante buena de las deflexiones laterales y de la ubicación del punto de pivote, para la carga de 270.5 kN se obtuvo una ligera sobrepredicción de las deflexiones laterales entre una profundidad de 4 a 7 m. Para este nivel de carga lateral también se presenta un desfase de aproximadamente un metro hacia debajo de la ubicación del punto de cero deflexión. Esto puede deberse a la forma de la relación del EI con el momento aplicada suministrada para este pilote. Puede ser que se esté modelando el pilote un poco más rígido de lo que realmente es, y que para esta zona, esta relación presente una degradación

del EI un poco mayor a la que realmente ocurrió en la realidad, traduciéndose esto en mayor cantidad de deflexión lateral y una ubicación un poco más profunda del punto de cero deflexión lateral. El cálculo del error entre los datos de deflexión lateral medidos y los calculados se presentan en la Tabla 6-10. Esta Tabla también presenta un promedio de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades que va desde 0.61 m hasta una profundidad variable dependiendo del nivel de carga lateral. Para la carga lateral de 51.6 kN (carga 1) la última profundidad del rango utilizado fue de 3.66 m, para la de 96.0 kN (carga 2) se promedió hasta 4.27 m y para el resto de las cargas laterales se promedió hasta 4.88 m. Estos rangos se utilizaron variables para poder obtener un promedio representativo de cada caso en particular. Para los valores máximos, mínimos y la desviación estándar se utilizaron los mismos rangos de profundidades que se utilizaron para obtener los promedios.

De esta Tabla se puede apreciar que para las cargas laterales de 51.6 y 96.0 kN se obtuvieron subpredicciones de aproximadamente 12% y 45% respectivamente. Para las cargas laterales intermedias se obtuvieron subpredicciones de las deflexiones laterales de entre 25 y 15%. Para las cargas laterales altas también se obtuvieron subpredicciones de las deflexiones laterales entre 12 y 4% en promedio. Para este pilote, con excepción del caso de cargas bajas, las deflexiones laterales obtenidas están un bastante cerca de la media lo refleja una buena consistencia del error a lo largo del pilote.

La deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno se muestra en la Figura 6-22. Se presenta una muy buena predicción de la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno para cada nivel de carga lateral. Solo para la última carga se aprecia una subpredicción de estas deflexiones laterales.

Tabla 6-10. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de FRP del tipo R = Medido/Calculado

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 5	R Carga 6
0.61	0.87	1.15	1.11	1.10	1.12	1.11
1.22	0.90	1.18	1.16	1.14	1.15	1.12
1.83	0.97	1.25	1.20	1.16	1.16	1.12
2.44	1.09	1.35	1.23	1.18	1.17	1.11
3.05	1.28	1.47	1.26	1.18	1.15	1.08
3.66	1.61	1.67	1.28	1.17	1.13	1.03
4.27	2.34	2.06	1.31	1.15	1.08	0.94
4.88	8.37	3.46	1.46	1.12	1.01	0.79
5.49	-0.65	-6.31	2.05	1.08	0.84	0.45
6.10	0.68	-0.33	0.43	2.04	-1.82	-2.11
6.71	1.25	0.32	1.18	1.44	1.80	3.32
7.32	1.37	0.40	1.19	1.29	1.39	2.13
7.92	1.41	0.06	1.02	1.01	1.09	1.76
8.53	1.30	-0.52	0.63	0.56	0.64	1.40
9.14	1.18	-1.71	0.14	-0.05	0.11	0.98
9.75	2.14	-3.61	-0.45	-0.83	-0.82	0.54
10.36	2.32	-8.62	-1.83	-2.50	-2.50	-0.48
10.97	11.15	-21.67	-3.59	-4.90	-5.50	-1.74
11.58	-140.75	-135.65	-13.44	-12.36	-13.89	-4.32
12.19	-46.27	55.12	47.43	-96.04	-77.42	-13.51
12.80	-53.16	42.92	13.32	23.91	62.17	15.09
13.41	-107.77	29.32	0.00	7.37	33.20	3.26
14.02	-164.26	45.63	0.00	9.06	34.55	1.88
14.63	-370.73	35.79	-13.86	0.00	37.36	-2.75
15.24	-1297.09	0.00	-42.60	-17.29	42.73	-9.81
15.85	-28921.56	0.00	-129.87	-66.37	70.97	-33.75
16.46	4467.74	0.00	-1576.21	-141.56	177.27	-48.83
Prom.	1.12	1.45	1.25	1.15	1.12	1.04
Min.	0.87	1.15	1.11	1.10	1.01	0.79
Max.	1.61	2.06	1.46	1.18	1.17	1.12
Desv. Est.	0.12	0.16	0.05	0.01	0.03	0.06

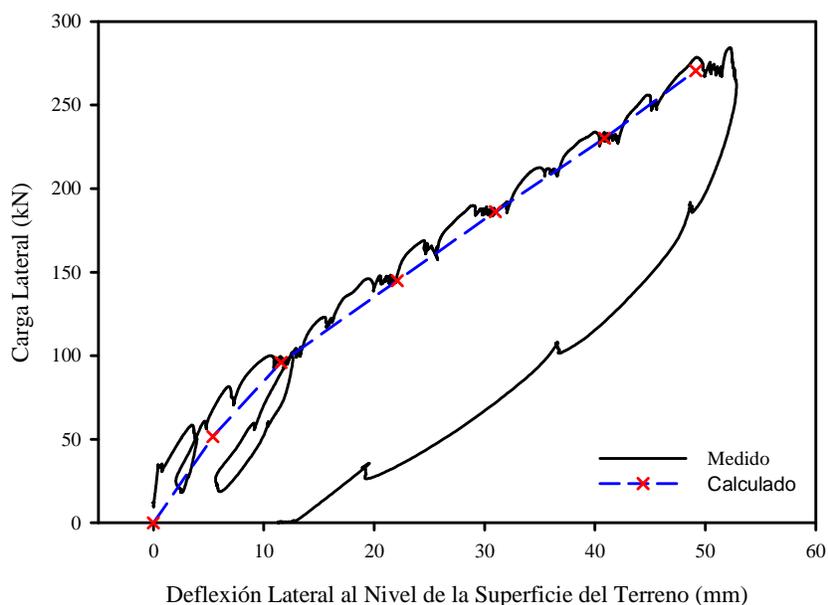


Figura 6-22. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de FRP a diferentes niveles de carga lateral.

Las predicciones de las deflexiones laterales con la profundidad y de la deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno para este pilote con SWM fueron bastante buenas. El SWM pudo predecir esto bastante bien sin la necesidad de modificaciones notables de las propiedades del suelo (como el ϵ_{50}) como fue el caso del pilote PSC.

6.3.3. Análisis del pilote de plástico reciclado

La descripción de este pilote es la misma descrita en la sección 6.2.3. Para modelar este pilote con SWM se utilizó una subdivisión entre 100 sub-estratos. Se realizaron análisis aumentando la cantidad en que se dividían los estratos y no se notó ninguna diferencia en los resultados. Por esto una división de 100 sub-estratos es aceptable para los fines de esta investigación.

Para determinar las propiedades del suelo necesarias para analizar el pilote plástico reciclado (PPI) con SWM se utilizaron correlaciones con los valores de la prueba de penetración

simple (SPT) del barreno más cercano a este pilote (Figura 6-1.). La Tabla 6-1 muestra las propiedades del suelo y los espesores de los estratos utilizados en el análisis con SWM.

Tabla 6-10. Estratos y propiedades del suelo utilizados en el modelo del pilote de PPI con SWM.

Pilote de Prueba	Capa No.	Esp. Estrato (m)	Tipo de Suelo	γ' (kN/m ³)	ϕ' (grados)	ϵ_{50} (deformación)
PPI $EI_{\text{metal}} = 7.17E4$ (kN - m ²)	1	0.91	Arena	19.8	31	Por Defecto
	2	1.5	Arena	10	27	Por Defecto
	3	7.5	Arena	10	33	Por Defecto
	4	10	Arena	11	35	Por Defecto

El número de capas, los espesores de cada capa, el tipo de suelo, los pesos específicos para cada capa y los ángulos de fricción interna para las capas 2 y 3 son los mismos que se utilizaron en el análisis con LPILE. El único parámetro común que varió fue el ángulo de fricción interna de las capas 1 y 2, el cual se escogió el menor valor calculado de las correlaciones utilizadas para así poder captar mejor las deflexiones en la zona de los estratos más someros. Los valores de ϵ_{50} son calculados internamente por el SWM por una ecuación que toma en cuenta las propiedades del suelo y el nivel de esfuerzos verticales efectivos. Cabe notar que las propiedades de este modelo son las mismas que se usaron para modelar el pilote PSC con SWM, lo único que cambia son los valores de ϵ_{50} para las capas 1, 2 y 3.

El modelo para este pilote toma en cuenta el punto de aplicación de la carga y la excavación realizada alrededor del pilote. Las comparaciones de los perfiles de deflexiones a lo largo del pilote medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para diferentes niveles de cargas laterales son mostrados en las Figuras 6-23, 6-24 y 6-25.

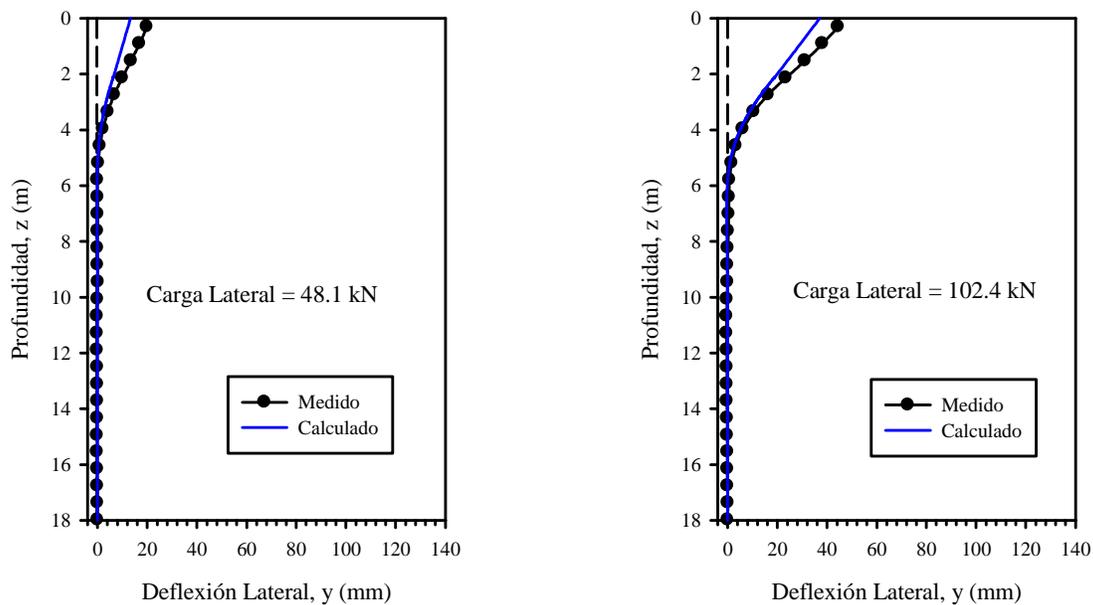


Figura 6-23. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales bajas.

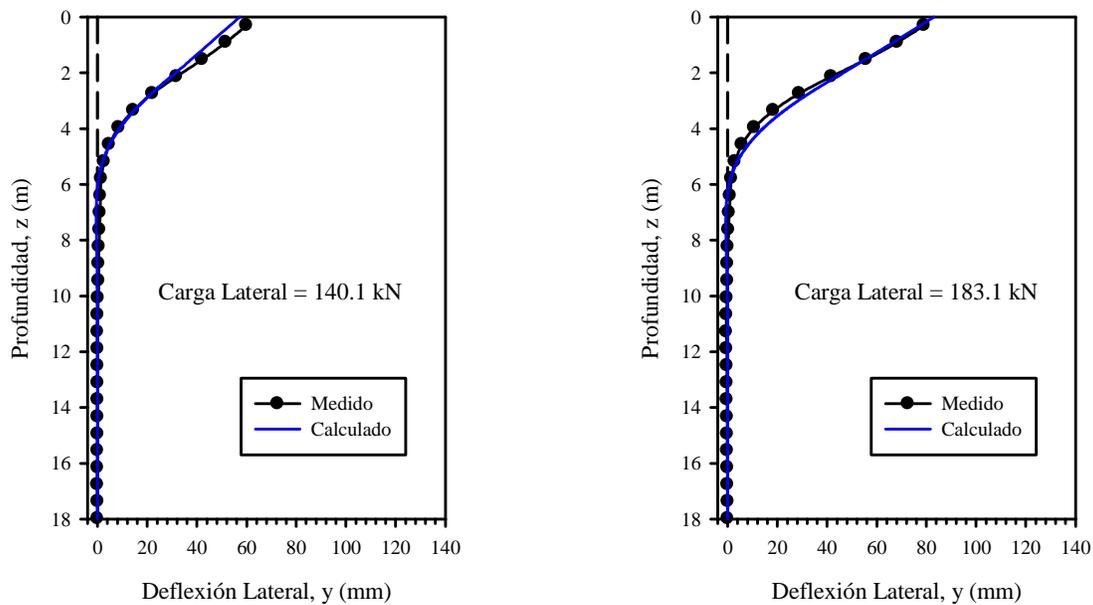


Figura 6-24. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales intermedias.

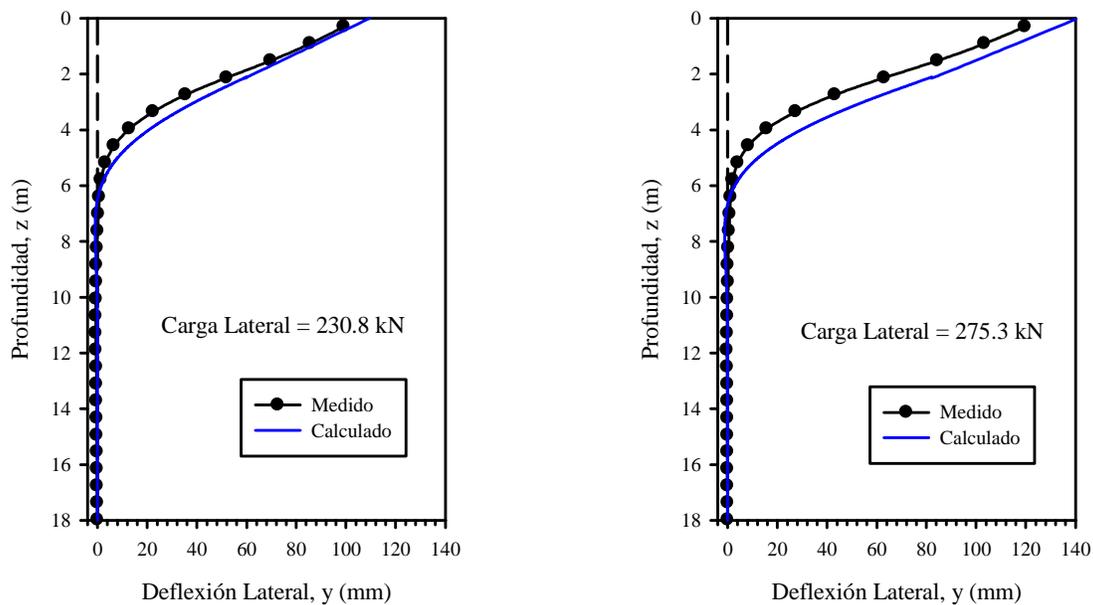


Figura 3-25. Comparación entre los perfiles de deflexiones laterales medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a niveles de cargas laterales altos.

Para niveles bajos de carga lateral se aprecia una subpredicción de las deflexiones laterales de aproximadamente toda la zona deformada del pilote. Para estas cargas bajas, la ubicación del punto de cero deflexión fue predicho con buena exactitud. Para niveles de carga intermedios se presenta una diferencia en las predicciones de ambas cargas, se obtuvo una subpredicción de las deflexiones laterales en los primeros 2.5 m de profundidad para el caso de 140.1 kN de carga lateral, en el caso de la carga lateral de 183.1 kN se obtuvo una buena predicción de los primeros 2.5 m de profundidad y una sobrepredicción de las deflexiones laterales desde esta profundidad hasta el punto de pivote del pilote. Para este nivel de cargas laterales, el punto de cero deflexión lateral también se predijo con bastante exactitud. Para niveles de cargas laterales altos se presenta una sobrepredicción de las deflexiones laterales a lo largo de toda la zona deflectada, esta sobrepredicción parece aumentar según aumentan las cargas laterales. El punto de cero deflexión para este nivel de cargas laterales también se predice con muy buena exactitud. El cálculo del error entre los datos de deflexión lateral medidos y los calculados se presentan en la Tabla 6-11. Esta Tabla también presenta un promedio de los errores, los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar. Estos fueron calculados solo tomando en cuenta un rango de profundidades que va desde 0.61 m hasta una profundidad

variable dependiendo del nivel de carga lateral. Para la carga lateral de 48.1 kN (carga 1) la última profundidad del rango utilizado fue de 3.96 m, para la de 102.4 kN (carga 2) se promedió hasta 4.57 m y para el resto de las cargas laterales se promedió hasta 5.18 m. Estos rangos se utilizaron variables para poder obtener un promedio representativo de cada caso en particular. Para los valores máximos, mínimos y la desviación estándar se utilizaron los mismos rangos de profundidades que se utilizaron para obtener los promedios.

De esta Tabla se puede apreciar que SWM subpredijo las deflexiones laterales para los casos de cargas laterales baja y las sobrepredijo para los casos de cargas laterales intermedias y altas. Se puede notar que, a medida que van aumentando las cargas laterales SWM predice deflexiones laterales cada vez más conservadores.

La deflexión lateral al nivel de la superficie del terreno se muestra en la Figura 6-26. Se presenta una predicción no muy consistente de las deflexiones laterales en la superficie del terreno. Para las primeras 3 cargas laterales (48.1 kN, 102.4 kN y 140.1 kN) es evidente una subpredicción de estas deflexiones. Para las siguientes dos cargas laterales (183.1 kN y 230.8 kN) se presenta una buena predicción. Para la última carga lateral (275.3 kN) se presenta una sobrepredicción relativamente grande de las deflexiones laterales al nivel de la superficie. La forma de la curva trazada por los punto de carga lateral versus deflexión al nivel de la superficie del terreno evidencia que SWM realizó el análisis de este pilote como si éste presentara un comportamiento más flexible que lo que realmente es.

Tabla 6-11. Diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas con SWM para el pilote de PPI del tipo R = Medido/Calculado

Profundidad (m)	Cargas Bajas		Cargas Intermedias		Cargas Altas	
	R Carga 1	R Carga 2	R Carga 3	R Carga 4	R Carga 1	R Carga 2
0.3	1.57	1.26	1.10	1.00	0.95	0.87
0.91	1.54	1.24	1.08	0.98	0.93	0.84
1.52	1.53	1.23	1.07	0.96	0.90	0.80
2.13	1.51	1.20	1.03	0.91	0.84	0.74
2.74	1.48	1.14	0.96	0.84	0.75	0.66
3.35	1.49	1.10	0.91	0.76	0.66	0.57
3.96	1.49	1.06	0.85	0.68	0.56	0.48
4.57	1.67	1.11	0.86	0.62	0.48	0.41
5.18	4.01	1.46	1.05	0.65	0.43	0.36
5.79	0.51	8.32	2.21	0.97	0.46	0.40
6.4	-0.20	-1.69	-5.14	-18.33	1.60	0.96
7.01	-0.54	-1.03	-1.86	-0.95	-0.53	-1.37
7.62	-0.21	-0.67	-1.53	-0.47	-0.04	-0.45
8.23	-0.31	-0.26	-1.55	-0.19	0.27	-0.29
8.84	-0.01	0.68	-1.80	0.33	0.73	-0.15
9.45	-12.63	0.79	-3.64	0.58	1.11	-0.35
10.06	9.12	11.17	-4.48	2.73	3.13	-0.10
10.67	-96.37	194.72	-6.40	13.77	10.48	0.88
11.28	-135.83	-114.22	-3.89	18899.65	66.50	6.59
11.89	-235.84	-100.78	7.85	-54.23	-93.43	-52.10
12.5	-629.32	-177.79	24.60	-62.56	-55.66	-15.59
13.11	10655.98	-847.29	44.73	-135.06	-90.83	-18.94
13.72	19481.26	26122.22	242.20	-765.02	-278.27	-41.69
14.33	-65452.99	37520.23	-1588.49	3716.63	-4173.81	-209.68
14.94	-60472.35	-34166.84	-8637.47	5267.78	2199.55	1135.89
15.54	-80092.76	-22448.31	-3552.28	358634.88	1902.16	1127.72
16.15	-89244.18	-20936.47	0.00	-530155.56	2856.37	1270.59
16.76	-214270.57	-71853.02	-6919.88	191029.81	10764.87	2714.40
17.37	186845.33	-6012490.47	10092.93	-155438.89	730206.25	-648.73
17.98	0	0	0	0	0	0
Prom.	1.52	1.17	0.99	0.82	0.72	0.64
Min.	1.48	1.06	0.85	0.62	0.43	0.36
Max.	1.57	1.26	1.10	1.00	0.95	0.87
Desv. Est.	0.01	0.04	0.05	0.08	0.11	0.10

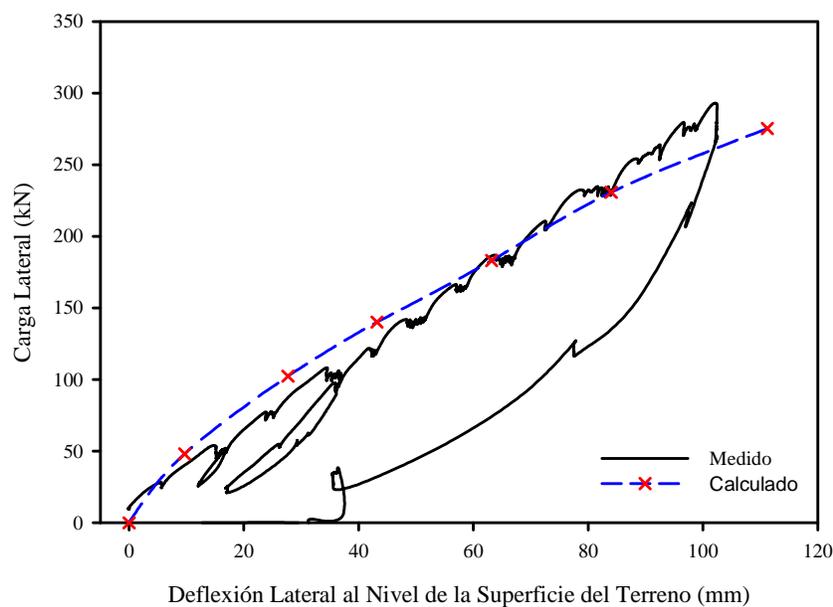


Figura 6-26. Comparación de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno medidos y el mejor ajuste calculado con SWM para el pilote de PPI a diferentes niveles de carga lateral.

Para este pilote las predicciones de las deflexiones laterales con SWM no fueron tan buenas como la de los pilotes anteriores. El comportamiento de este pilote bajo cargas laterales no fue captado con mucha exactitud por SWM. Sin embargo las diferencias entre lo medido y lo calculado se encuentran aceptables para los fines de esta investigación.

6.4. Influencia del EI en la reacción del suelo y curvas p-y

La influencia de la rigidez a la flexión sobre la reacción del suelo será determinada por medio del uso de curvas p-y. Las curvas p-y a cierta profundidad representan el rango de deflexiones laterales y de reacciones del suelo resultantes al aplicar un rango determinado de cargas laterales. La forma de construcción de una curva p-y es, para un punto a una profundidad x por debajo de la superficie del terreno, se obtienen las deflexiones y reacciones del suelo asociadas a diferentes incrementos de carga, con cada uno de los incrementos de carga se va generando un punto de la curva con coordenadas (y,p) para los ejes de abscisas y ordenadas respectivamente. Por esto, al determinar las curvas p-y a la misma profundidad para los 3 pilotes podremos saber cuál es la reacción del suelo para exactamente la misma cantidad de deflexión lateral.

Se determinaron curvas p-y a diferentes profundidades utilizando SWM y LPILE. Como se mencionó anteriormente en este capítulo, SWM es capaz de generar sus propias curvas p-y sin necesidad de introducir ninguna especificación especial, por otro lado, LPILE es capaz de generar curvas p-y a diferentes profundidades, pero el usuario debe indicarle previamente que tipo de curva p-y de la literatura desea utilizar. Las curvas p-y determinadas utilizando LPILE para los 3 pilotes a profundidades de 2.91 y 3.91 m por debajo de la superficie del terreno son mostradas en la Figura 6-27.

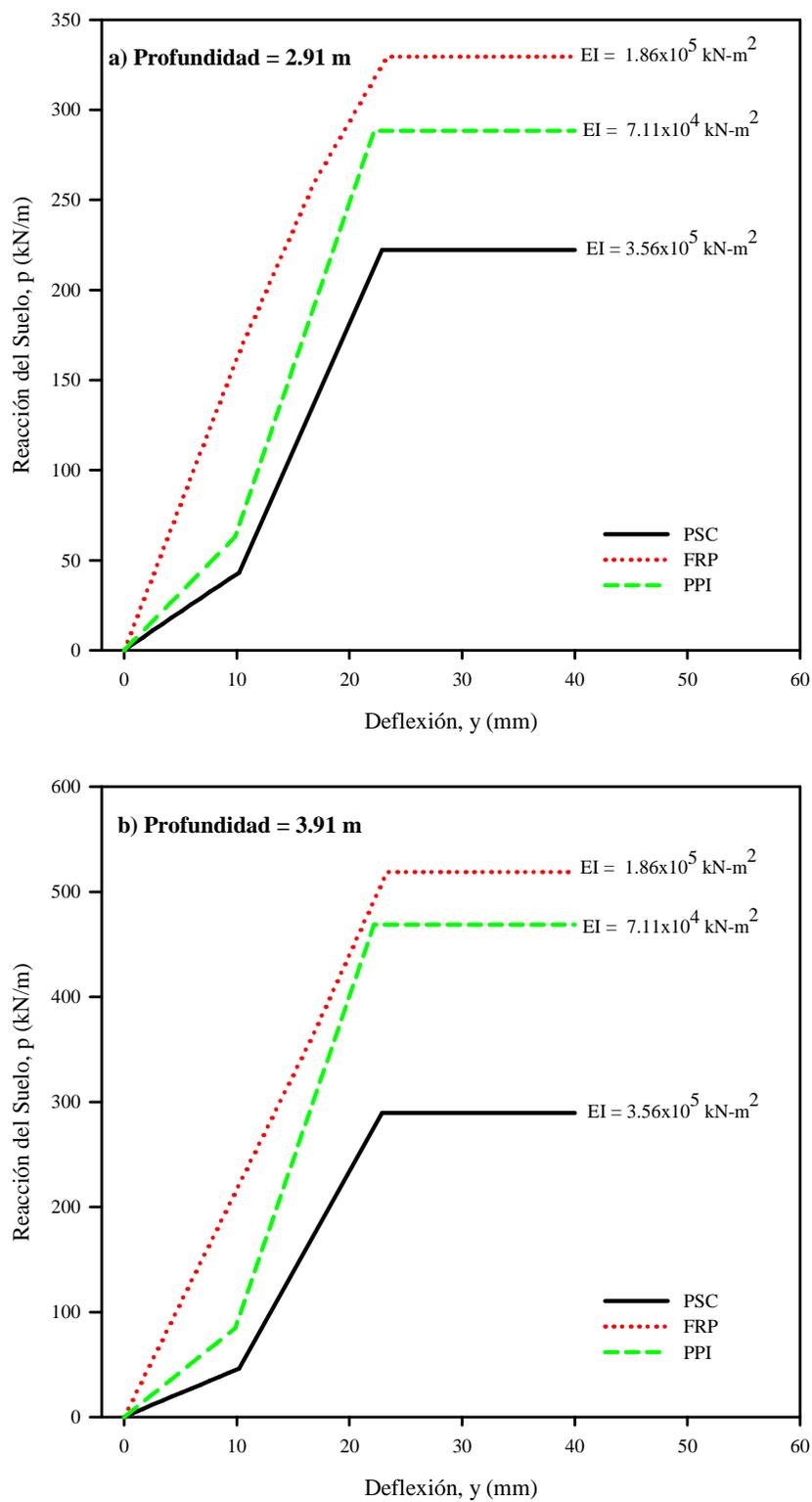


Figura 6-27. Curvas p - y determinadas utilizando LIPLÉ para los 3 pilotes de prueba a diferentes profundidades.

Estas curvas p-y fueron determinadas a profundidades donde el suelo presenta propiedades bastante similares para así poder ser comparables entre ellas. Las curvas p-y determinadas con LPILE para los 3 pilotes (Figura 6-27.) presentan notables diferencias en forma, reacción última, y deflexión a la que ocurre la reacción última del suelo. Con excepción de la curva p-y para el pilote PSC, estas diferencias se deben mayormente a las ligeras diferencias en diámetros y los diferentes coeficientes de subrasantes utilizados para cada pilote. Principalmente las diferencias que presentan las curvas p-y para el pilote PSC en comparación con las otras se deben a que se para modelar este pilote se utilizaron las curvas p-y de API (1987), las cuales para estas condiciones del subsuelo proporcionaron más capacidad de deflexión al pilote y menor reacción última del suelo. Para los pilotes FRP y PPI se utilizaron las curvas p-y de Reese et al. (1974), las cuales presentan ser menos flexibles y proporcionan mayor reacción última del suelo.

Si solo comparamos las curvas p-y para los pilotes FRP y PPI obtenidas con LPILE, donde el pilote FRP es aproximadamente 2.6 veces más rígido que el pilote PPI, podemos notar que aunque para ambos pilotes se utilizaron el mismo tipo de curvas p-y y mismas propiedades del suelo (con excepción del K), es notable que el pilote más rígido (FRP) genera reacciones del suelo mayores a las que se generan con el pilote PPI a la misma cantidad de deflexión. La diferencia entre las reacciones últimas del suelo para ambos pilotes se debe principalmente a pequeñas diferencias en el esfuerzo vertical efectivo y el diámetro del pilote. Si todo coincidiera exactamente igual, estas reacciones últimas del suelo fueran exactamente iguales, porque como vimos en el Capítulo 2, esta solo depende de las propiedades del suelo, el diámetro del pilote y la profundidad a la que se desea obtener la curva p-y.

Para poder comprender mejor el comportamiento de las curvas p-y para estos 3 pilotes preferimos utilizar el SWM el cual si toma en cuenta el EI del pilote y nos va a dar una mejor idea de cuál es la influencia del mismo sobre la reacción del suelo. La figura 6-28 muestra las curvas p-y para los 3 pilotes obtenidas con SWM a las mismas profundidades a las que se obtuvieron con LPILE (2.91 y 3.91 m).

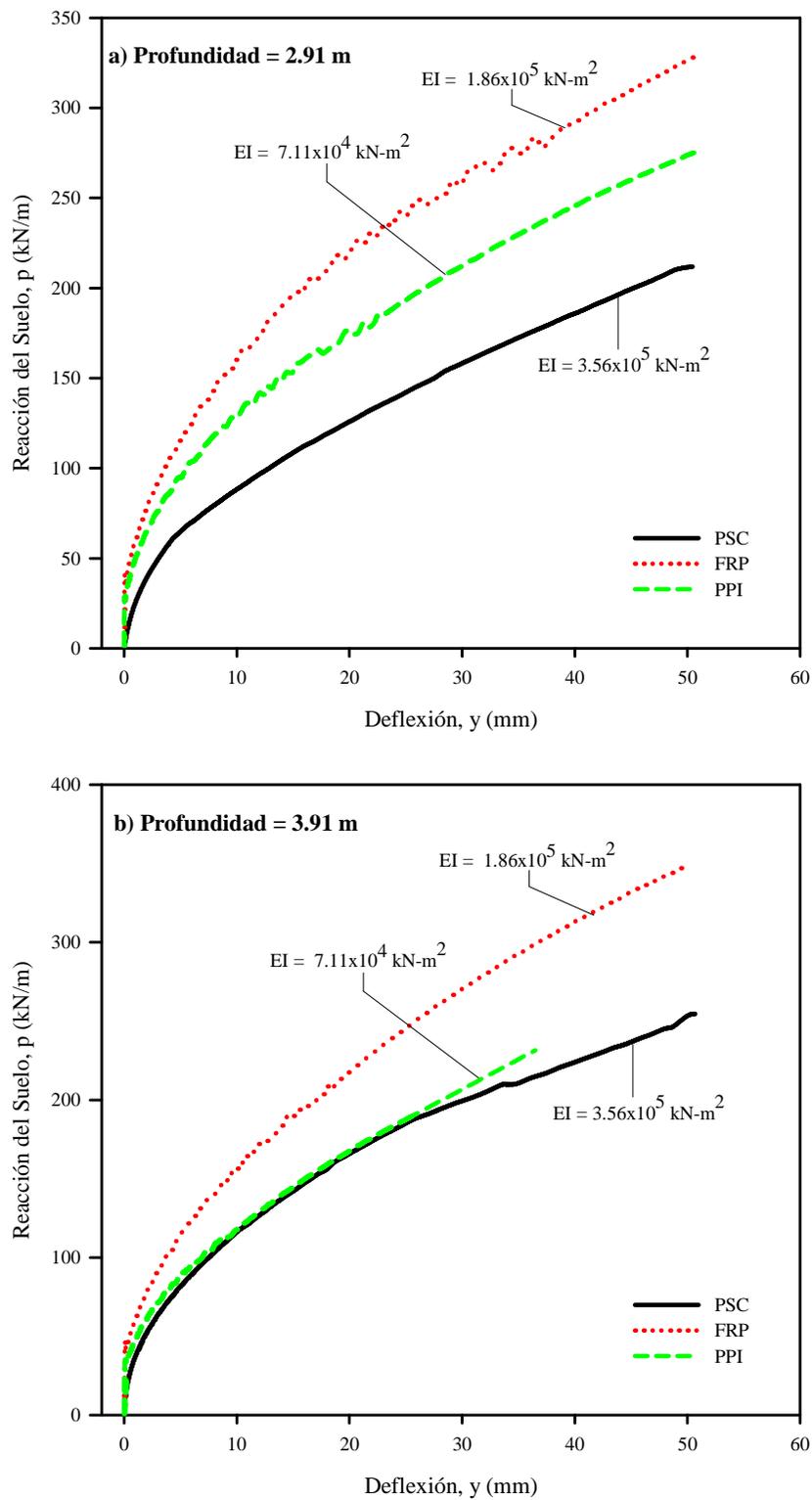


Figura 6-28. Curvas p - y determinadas utilizando SWM para los 3 pilotes de prueba a diferentes profundidades.

Las curvas p-y de la Figura 6-28a presentan notables diferencias en relación a la reacción del suelo. La tendencia de estas curvas p-y no fue la esperada. Como vimos en el Capítulo 3, en arenas la tendencia de las curvas p-y determinadas con SWM es que, al aumentar el EI del pilote las curvas p-y se van rigidizando y se obtienen mayores reacciones del suelo a menores cantidades de deflexión lateral. La tendencia esperada para estos pilotes instalados en este tipo de suelo era que, el pilote más flexible (PPI) generara menores reacciones del suelo y estas fueran ascendiendo según la rigidez del pilote. Esto quiere decir que el pilote más rígido (PSC) el cual es aproximadamente 1.9 veces más rígido que el pilote FRP y 4.8 veces más rígido que el pilote PPI, debió presentar una carga p-y más rígida, con reacciones del suelo a la misma cantidad de deflexión lateral mayores a la de los otros pilotes. La tendencia esperada se cumplió para los pilotes FRP y PPI, donde el pilote de FRP presenta generar mayores reacciones en el suelo que el pilote PPI. Una de las razones por la cual las curvas p-y para el pilote PSC no siguieron la tendencia esperada es por los valores relativamente altos del valor de la deformación al 50% del esfuerzo desviador (ϵ_{50}) que se utilizaron en 3 de las capas del modelo, éste es uno de los parámetros del suelo esenciales en el análisis con el MCD, por esto el nombre “Método de la Cuña de Deformación”. Este parámetro del suelo en el MCD influye directamente en la cantidad de deflexión lateral, en la reacción del suelo y por ende en el módulo de subrasante, a mayores valores de ϵ_{50} se generan mayores deflexiones laterales y menores reacciones en el suelo. Más información acerca de las formulaciones en el MCD son mostradas en detalle en el Capítulo 2. Aunque para los 3 pilotes se utilizaron las mismas propiedades del suelo (γ' y ϕ') a la profundidad donde se están determinando estas curvas p-y, se tuvieron que utilizar diferentes valores de ϵ_{50} para modelar el pilote PSC y poder igualar las deflexiones que se obtuvieron en la prueba de carga lateral. Estos valores tan altos de ϵ_{50} influyeron en las deflexiones laterales y en las reacciones del suelo, obteniendo así una curva p-y mucho más flexible que la de los otros pilotes. Para mostrar que tanto influye este parámetro en la forma de las curvas p-y y las reacciones del suelo, se determinaron curvas p-y a una profundidad de 2.91 m para los 3 pilotes utilizando valores de ϵ_{50} por defecto de SWM para el pilote PSC, para los otros pilotes, las propiedades del suelo se dejaron idénticas a las utilizadas anteriormente, estas curvas p-y son presentadas en la Figura 6-29.

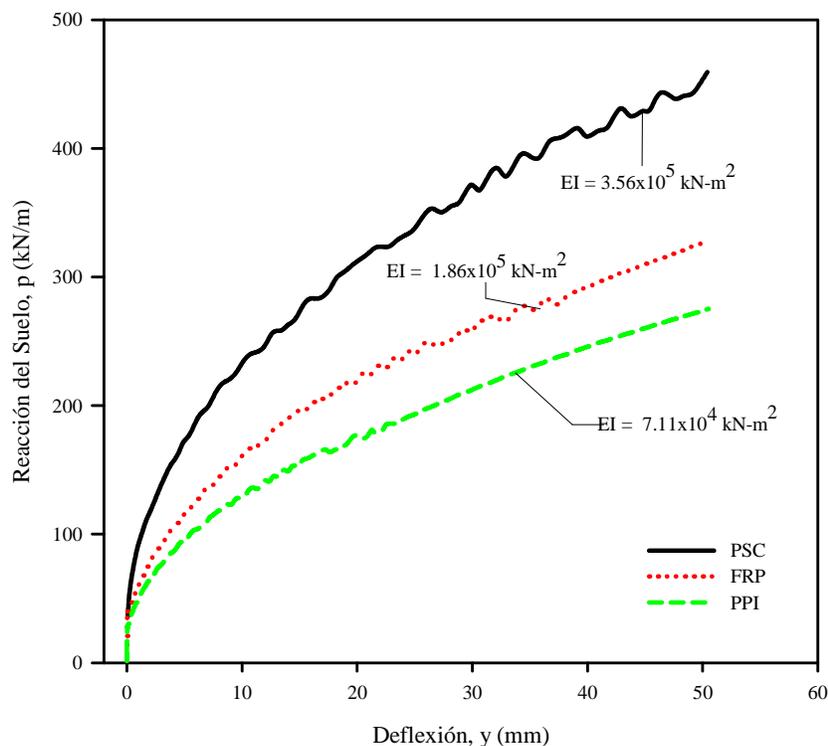


Figura 6-29. Curvas p-y determinadas utilizando SWM para los 3 pilotes de prueba utilizando los mismos valores de ϵ_{50} para los 3 pilotes a una profundidad de 2.91 m.

Se puede notar una gran diferencia entre la curva p-y del pilote PSC de esta Figura y la mostrada en la Figura 6-28. Al utilizar los mismos valores de ϵ_{50} para todas las capas de los modelos de los 3 pilotes obtenemos la misma tendencia presentada en el Capítulo 3 para suelos arenosos. El pilote más flexible (PPI) es el que presenta menores reacciones del suelo, luego se van obteniendo mayores reacciones del suelo a medida que el EI del pilote aumenta.

De la Figura 6-28b se puede observar que las curvas p-y para los pilotes PSC y PPI son casi idénticas, esto se debe a que, como las curvas p-y generadas con SWM dependen del nivel de esfuerzos y del tamaño de la cuña pasiva, la profundidad a la cual se están determinando estas curvas p-y (3.91 m) está muy cerca del punto de cero deflexión del pilote PPI, las deflexiones a esta profundidad se asemejan mucho a las deflexiones que presenta el pilote PSC.

En vista de las diferencias entre los valores de ϵ_{50} entre el pilote PSC y los pilotes FRP y PPI, se decidió no tomar en cuenta las reacciones del suelo obtenidas en el pilote PSC.

Entre los pilotes de FRP y PPI se presentan notables diferencias entre las reacciones del suelo para la misma cantidad de deflexión lateral. Por ejemplo para una deflexión lateral de 20 mm a una profundidad de 2.91 m bajo el nivel de la superficie del terreno, se computa una reacción del suelo de 220 kN/m para el pilote de FRP y 176 kN/m para el pilote de PPI, esto es una diferencia de aproximadamente 25% en la reacción del suelo para solo una diferencia entre los EI de cada pilote de 2.6 veces más rígido. Esta diferencia entre las reacciones del suelo se incrementaría grandemente si la diferencia entre los EI fuera mayor (por ejemplo la diferencia entre el pilote de PSC y el de PPI) y si las condiciones del suelo fueran las de una arena más densa.

Es de interés saber si realmente la tendencia de las curvas p-y presentadas en las Figuras 6-27 y 6-28 es la que siguen realmente las curvas p-y reales. Para esto se determinaron curvas p-y a una profundidad de 2.91 m debajo del nivel de la superficie del terreno utilizando la metodología propuesta en el Capítulo 4, las cuales son mostradas en la Figura 6-30.

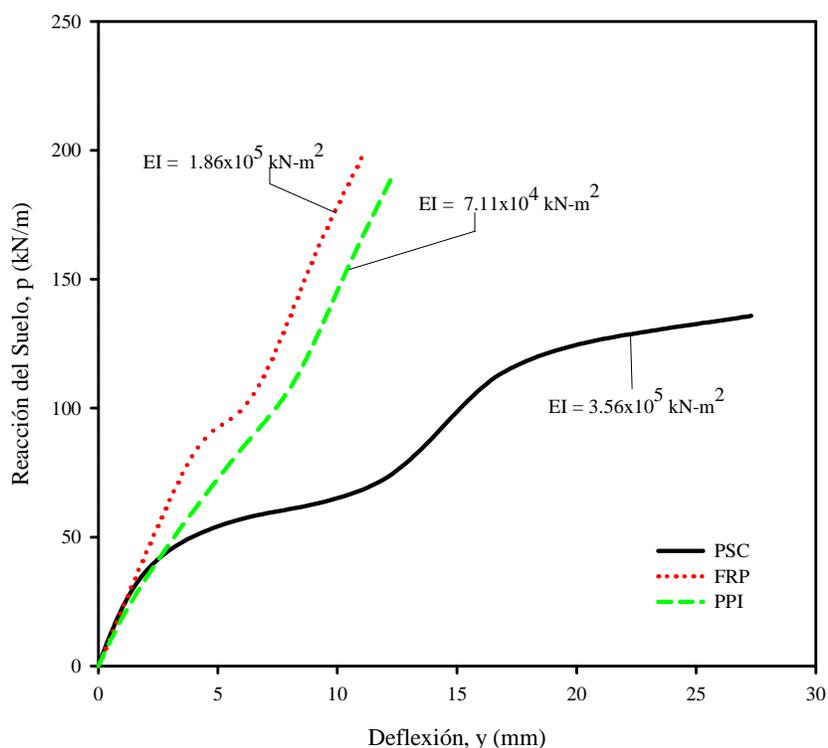


Figura 6-30. Curvas p-y determinadas utilizando la metodología propuesta en el Capítulo 4 para los 3 pilotes de prueba a una profundidad de 2.91 m.

Las curvas p-y que de esta Figura presentan la misma tendencia que las de las curvas p-y determinadas con LPILE y SWM, donde el pilote FRP es el que genera mayores reacciones en el suelo, luego el de PPI y luego el de PSC. Con esto se puede afirmar que la predicción de las curvas p-y utilizando el MCD es bastante buena. Al aplicar la metodología presentada en el Capítulo 4 para determinar curvas p-y desde datos de inclinómetros notamos que es bastante difícil determinar curvas p-y de esta forma. Aunque se tomaron medidas para obtener las mejores predicciones posibles, la cuarta derivación de las deflexiones arraiga en errores bastante grandes. También la complejidad de un perfil de suelos real, las diferentes ubicaciones de la cabeza de los pilotes sobre el nivel de la superficie del terreno y las ubicaciones de los puntos de cero deflexión lateral comparada con los cambios de densidades en el suelo dificultaron la determinación de estas curvas p-y.

Todas las curvas p-y determinadas con LPILE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4, presentaron tener la misma tendencia, lo que nos lleva a afirmar que el EI del pilote si influye sobre la reacción del suelo. De manera que, al aumentar el EI del pilote, éste moviliza mayor cantidad de suelo (la profundidad a la que se localiza el punto de cero deflexión va aumentando con el EI) lo cual genera mayores reacciones en el suelo. Este efecto es más notable en arenas densas y muy densas. Para arenas sueltas y ligeramente densas, como es el caso del estado de las arenas ubicadas a la profundidad a la que se determinaron estas curvas p-y, el EI del pilote tiene una menor influencia y el efecto de generar mayores reacciones en el suelo según aumenta el EI del pilote se nota un poco menos.

6.5. Resumen y conclusiones

En este capítulo se estudió la influencia del EI sobre la reacción del suelo en un caso real con el uso de las curvas p-y. Para esto se realizaron análisis de los 3 pilotes de prueba del caso histórico de Hampton, Virginia (explicado en detalle en el Capítulo 5) utilizando LPILE y SWM. Se compararon las curvas p-y determinadas con LPILE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4. Los hallazgos más importantes de los análisis de los 3 pilotes realizados con LPILE y SWM son presentados a continuación:

1. Se presentó una muy buena predicción del perfil de deflexiones laterales con la profundidad para los 3 pilotes utilizando LPILE, sin embargo, para poder obtener tan buenas predicciones de la deflexión de los pilotes fue necesario utilizar diferentes valores del coeficiente de subrasante, para así proporcionar mayor o menor cantidad de deflexión al suelo según sea el caso.
2. En el cálculo de las deflexiones laterales, la ubicación del punto de cero deflexión y las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno para el pilote de PSC utilizando LPILE no fueron tan acertadas como las predicciones para los pilotes de FRP y PPI.
3. La predicción de la ubicación del punto de cero deflexión para el pilote de FRP utilizando LPILE se presentó un poco más arriba de lo que se observa en la prueba de carga lateral. Lo que quiere decir que el modelo de LPILE para este pilote simula un comportamiento un poco más flexible para este pilote de lo que realmente es en la realidad. Por otro lado, se presentó una predicción aceptable del perfil de deflexiones laterales del pilote, y una muy buena predicción de las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno.
4. Para el pilote de PPI se presentó una predicción casi perfecta de las deflexiones laterales, la ubicación del punto de cero deflexión y las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno utilizando LPILE. Esto refleja una buena selección de las propiedades del suelo y del pilote, del número de capas y de los espesores de cada capa.
5. En general se obtuvieron muy buenas predicciones de las deflexiones laterales para los 3 pilotes de prueba utilizando el MCD y SWM.
6. Para poder obtener unas predicciones aceptables del perfil de deflexiones con la profundidad para el pilote de PSC con SWM fue necesario modificar los valores de ε_{50} para las 3 primeras capas del modelo utilizado.
7. Las predicciones para el pilote de PPI utilizando SWM no fueron tan acertadas, de los 6 perfiles de deflexiones laterales solo 2 se acercaron bastante bien, sin embargo los errores obtenidos se consideran aceptables para esta investigación.
8. La mejor predicción de las deflexiones laterales, la ubicación del punto de cero deflexión y las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno utilizando SWM se obtuvo para el pilote de FRP.
9. Aunque las curvas p-y determinadas con LPILE no toman en cuenta el EI del pilote, se presentó una diferencia en la forma y las reacciones últimas del suelo. Estas diferencias

se deben mayormente a los diferentes módulos de subrasantes utilizados, pequeñas diferencias en el diámetro de los pilotes y pequeñas diferencias en el esfuerzo vertical efectivo.

10. Las curvas p-y de los 3 pilotes a la misma profundidad debajo de la superficie del terreno determinadas utilizando LIPLE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4 presentaron las mismas tendencias, esto es, la curva p-y más rígida o la que genera mayores cantidades de reacción del suelo a menor cantidad de deflexión pertenece al pilote de FRP, luego, la curva menos rígida que la de FRP pertenece al pilote de PPI y finalmente, la curva p-y más flexible o la que genera menor cantidad de reacción del suelo a mayor cantidad de deflexión lateral pertenece al pilote de PSC.
11. Debido a que los ϵ_{50} utilizados en para modelar el pilote de PSC con SWM a la profundidad a la que se determinaron las curvas p-y no coinciden con los ϵ_{50} utilizados en el modelos de los otros dos pilotes, los resultados de este pilote no se tomaron en cuenta para determinar la influencia del EI en la reacción del suelo.
12. El ϵ_{50} del suelo es un parámetro muy importante en el MCD por esto el nombre de “método de la cuña de deformación”. Este parámetro influye directamente en la capacidad de deflexión lateral del pilote, en la reacción del suelo y por ende en el módulo de subrasante. Mayores valores de ϵ_{50} generan mayores valores de deflexión lateral y menores valores de la reacción del suelo.
13. De las curvas p-y de los pilotes de FRP y PPI se puede concluir que el EI del pilote si influye en la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y. A medida que aumenta el EI del pilote, aumentan las reacciones del suelo y se genera menor cantidad de deflexión lateral.
14. Las reacciones del suelo aumentan al aumentar el EI del pilote porque la ubicación del punto de cero deflexión lateral se encuentra a una profundidad mayor bajo la superficie del terreno, lo que se traduce en un mayor tamaño de la cuña pasiva y una movilización mayor de un volumen de suelo, lo que genera mayores reacciones en el suelo.
15. En el caso de estos pilotes de prueba, el pilote de FRP es 2.6 veces más rígido que el pilote de PPI. A una deflexión lateral de 20 mm para las curvas p-y determinadas con SWM se presenta una reacción del suelo de 220 kN/m para el pilote de FRP y 176 kN/m para el pilote de PPI, esto es una diferencia de aproximadamente 25% en la reacción del

suelo para esta diferencia relativamente pequeña en rigideces. Este efecto es más notable en arenas densas y muy densas.

16. Para arenas sueltas y ligeramente densas, como es el caso del estado de las arenas ubicadas a la profundidad a la que se determinaron estas curvas p-y, el EI del pilote tiene una influencia baja sobre la reacción del suelo y el efecto de generar mayores reacciones en el suelo según aumenta el EI del pilote se nota relativamente menos.

CAPÍTULO 7

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

7.1 Introducción

En esta tesis se determinó la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y utilizando programas comerciales de computadoras normalmente utilizados en la práctica. Se realizaron análisis de casos hipotéticos y casos reales de pilotes cargados lateralmente. A continuación se presenta un resumen de los hallazgos más significativos de cada capítulo, las conclusiones principales y recomendaciones para futuras investigaciones.

7.2 Resumen

En el capítulo 2 se presentó la derivación de la ecuación diferencial que gobierna el problema de pilotes cargados lateralmente basado en teoría de vigas, y se citaron las características principales de dos métodos para análisis de pilotes bajo carga lateral los cuales están basados básicamente en los mismos principios de resolución de la ecuación diferencial. Estos dos métodos son el de las curvas p-y y el de la cuña de deformación (MCD). También se habló del módulo horizontal de subrasante el cual es un parámetro que juega un papel muy importante en la determinación de las reacciones del suelo tanto en el método de las curvas p-y no lineales como en el método de la cuña de deformación. Otro punto importante que se tocó en la revisión de literatura fue la influencia de la rigidez a la flexión en la reacción del suelo.

La metodología de curvas p-y no lineales es la más utilizada en la práctica para resolver el problema de pilotes cargados lateralmente. Todas las curvas p-y de la literatura solo toman en cuenta las propiedades del suelo y el ancho del pilote en sus formulaciones. Las curvas p-y no toman en cuenta propiedades del pilote como la sección transversal ni el EI del pilote.

El método de la cuña de deformación (MCD) es un método que no es tan popular en la práctica en comparación con el de las curvas p-y, pero ha demostrado ser un método bastante efectivo en el análisis de pilotes cargados lateralmente. Este método toma en cuenta la continuidad del suelo dentro de la cuña pasiva, las propiedades del suelo y del pilote y es capaz de generar curvas p-y que toman todo esto en consideración.

El módulo horizontal subrasante es la representación de la presión que se genera entre el pilote y el suelo cuando éste es cargado lateralmente. Este módulo es muy importante en la determinación de la respuesta del suelo ya que ambos métodos (curvas p-y y MCD) lo utilizan como la pendiente inicial de la curva que representa la respuesta del suelo. A diferencia del MCD el cual se generó principalmente para determinar el perfil de la variación no lineal de este módulo con la profundidad, en el método de las curvas p-y el usuario debe introducir el valor de este módulo de forma manual.

La influencia del EI del pilote en la respuesta del suelo es algo que se ha sido estudiado analíticamente por diferentes autores, y se ha creado cierta ambigüedad al respecto. Algunos autores concluyeron que el EI del pilote no es un parámetro sensitivo en la respuesta del suelo, pero otros autores concluyen que éste sí es un parámetro sensitivo en la respuesta del pilote.

En el capítulo 3 se determinó la influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre la reacción del suelo utilizando la relación de la deflexión lateral del pilote con las reacción del suelo también conocida como curvas p-y. Se analizaron casos hipotéticos de pilotes flexibles, medios rígidos y rígidos utilizando ambos tipos de modelación del material (EI lineal y no lineal), a los cuales se les determinaron las curvas p-y teóricas para los casos de pilotes embebidos en arena suelta, medianamente densa y densa. La determinación de las curvas p-y se realizó utilizando la versión modificada del programa de computadora SWM 6.1. Se presentaron curvas p-y a 1, 2 y 3 m de profundidad. Para ninguno de los casos las reacciones últimas del suelo pudieron ser determinadas porque, como las curvas p-y determinadas con este programa toman en cuenta el nivel de esfuerzos, primero se llegó a una falla estructural del pilote antes de que se genere la máxima reacción que el suelo puede soportar a la profundidad de interés.

De este capítulo se pudo determinar que la profundidad a la que se extiende la zona afectada del suelo cuando el pilote es cargado lateralmente se ve directamente influenciada por el

EI del pilote, estos exhiben una relación directamente proporcional, a mayor EI mayor es la zona afectada del suelo (cuña pasiva). También se determinó que la pendiente inicial de las curvas p-y también conocido como módulo horizontal de subrasante casi no se ve afectado con la variación del EI del pilote.

El capítulo 4 se describió el procedimiento utilizado para determinar la distribución de momentos a lo largo del pilote y las curvas p-y desde datos de deflexión obtenidos utilizando inclinómetros. También se presentó la calibración del método utilizando los datos de deflexión obtenidos con LPILE. El proceso de calibración fue bastante útil para validar el método y saber cuáles son sus limitantes. Un buen estimado de la distribución de momentos con la profundidad se puede obtener con el procedimiento propuesto. Considerando que se efectúa hasta la cuarta derivada de la deflexión del pilote, un buen estimado de las reacciones del suelo-pilote es obtenido utilizando la metodología propuesta si esta se utiliza sobre pilotes instalados en estratos de suelos prácticamente homogéneos. Esta metodología también puede ser utilizada para determinar con bastante exactitud el módulo tangencial máximo de la curva p-y también conocido como módulo de subrasante.

También se determinó que este procedimiento puede ser utilizado para determinar las curvas p-y a pilotes cuyo material se comporte en el rango no lineal, pero se deben tomar precauciones en el caso de grandes deformaciones del pilote las cuales generan una forma casi plana de la deflectada, dificultando así el proceso de ajuste de curva polinómico cubico. El método no es muy efectivo si se desea obtener las curvas p-y a profundidades cercanas a la superficie o a profundidades cercanas al punto de pivote o punto de cero giro del pilote.

El capítulo 5 describe el caso histórico de Hampton, Virginia desarrollado por Pando (2003). Se presenta el programa de prueba de carga llevado a cabo para poder permitir la comparación del comportamiento bajo cargas laterales de tres pilotes: [1] uno convencional, pilote de hormigón pretensado cuadrado de 610 mm de diámetro; [2] un pilote compuesto de 622 mm formado por un tubo de FRP relleno de hormigón y reforzado con un armado de acero; y [3] un pilote de polietileno de 592 mm de diámetro reforzado con barras de acero. Ensayos de laboratorio fueron realizados a los materiales de los pilotes para determinar sus propiedades. Los pilotes tienen una longitud de aproximadamente 18 m de largo. Se realizó una investigación del subsuelo en el lugar del sitio de prueba, este perfil de suelo consta mayormente de arena suelta y

medianamente densa con un pequeño estrato de arcilla arenosa de consistencia rígida con un espesor de 2.5 m localizada de 1 a 3.5 m sobre el pie de los pilotes.

De los pilotes de prueba se pudo notar que el pilote de hormigón pretensado es el que presenta mayor rigidez a la flexión, luego le sigue el pilote de FRP y luego el pilote de plástico reciclado. Aunque el EI del pilote de hormigón pretensado tiene un EI que es aproximadamente el doble del EI del pilote de FRP ambos presentaron deflexiones laterales similares al nivel de superficie del terreno. El pilote de plástico (menor EI) fue el que presentó mayor cantidad de deflexión al nivel de la superficie del terreno. También se determinó que el punto de pivote o de cero deflexión el cual define la altura de la cuña pasiva depende del EI del pilote y del punto de aplicación de la carga.

En el capítulo 6 se determinó la influencia del EI sobre la reacción del suelo en un caso real con el uso de las curvas p-y. Para esto se realizaron análisis de los 3 pilotes de prueba del caso histórico de Hampton, utilizando LPILE y SWM. Se compararon las curvas p-y determinadas con LPILE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4. Los resultados obtenidos presentaron una muy buena predicción del perfil de deflexiones laterales con la profundidad para los 3 pilotes utilizando LPILE, sin embargo, para poder obtener tan buenas predicciones de la deflexión de los pilotes fue necesario utilizar diferentes valores del coeficiente de subrasante, para así proporcionar mayor o menor cantidad de deflexión al suelo según sea el caso. La predicción de las deflexiones laterales, la ubicación del punto de cero deflexión y las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno para el pilote de PSC utilizando LPILE no fueron tan acertadas como las predicciones para los pilotes de FRP y PPI.

En general se obtuvieron muy buenas predicciones de las deflexiones laterales para los 3 pilotes de prueba utilizando el MCD y SWM. Para poder obtener unas predicciones aceptables del perfil de deflexiones con la profundidad para el pilote de PSC con SWM fue necesario modificar los valores de ε_{50} para las 3 primeras capas del modelo utilizado. Las predicciones para el pilote de PPI utilizando SWM no fueron tan acertadas, de los 6 perfiles de deflexiones laterales solo 2 se acercaron bastante bien, sin embargo los errores obtenidos se consideran aceptables para esta investigación. La mejor predicción de las deflexiones laterales, la ubicación

del punto de cero deflexión y las deflexiones laterales al nivel de la superficie del terreno utilizando SWM se obtuvo para el pilote de FRP.

También de este capítulo se determinó que, aunque las curvas p-y determinadas con LPILE no toman en cuenta el EI del pilote, se presentó una diferencia en la forma y las reacciones últimas del suelo. Estas diferencias se deben mayormente a los diferentes módulos de subrasantes utilizados, pequeñas diferencias en el diámetro de los pilotes y pequeñas diferencias en el esfuerzo vertical efectivo. Las curvas p-y de los 3 pilotes a la misma profundidad debajo de la superficie del terreno determinadas utilizando LPILE, SWM y la metodología propuesta en el Capítulo 4 presentaron las mismas tendencias, esto es, la curva p-y más rígida o la que genera mayores cantidades de reacción del suelo a menor cantidad de deflexión, estas pertenece al pilote de FRP, luego, la curva menos rígida que la de FRP pertenece al pilote de PPI y finalmente, la curva p-y más flexible o la que genera menor cantidad de reacción del suelo a mayor cantidad de deflexión lateral pertenece al pilote de PSC. Debido a que los ϵ_{50} utilizados en para modelar el pilote de PSC con SWM a la profundidad a la que se determinaron las curvas p-y no coinciden con los ϵ_{50} utilizados en el modelos de los otros dos pilotes, los resultados de este pilote no se tomaron en cuenta para determinar la influencia del EI en la reacción del suelo.

Otro hallazgo importante obtenido en este capítulo es que el ϵ_{50} del suelo es un parámetro muy importante en el MCD por esto el nombre de “método de la cuña de deformación”. Este parámetro influye directamente en la capacidad de deflexión lateral del pilote, en la reacción del suelo y por ende en el módulo de subrasante. Mayores valores de ϵ_{50} generan mayores valores de deflexión lateral y menores valores de la reacción del suelo.

7.3 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta tesis se ha podido llegar a la conclusión de que el EI del pilote si influye sobre la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y en suelos arenosos. Con el uso del estudio de casos hipotéticos con el MCD se pudo llegar a la conclusión que, para arenas sueltas, el EI del pilote ejerce poca influencia en la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y con la profundidad. También, que para arenas medianamente densas y densas,

el EI del pilote ejerce una gran influencia en la forma de las curvas p-y y las reacciones del suelo con la profundidad. Entre un pilote flexible y uno rígido se llegó a obtener una diferencia de hasta 400 kN/m de la reacción del suelo determinada a la misma cantidad de deflexión lateral.

De los análisis realizados al caso histórico de Hampton, Virginia se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

1. De las curvas p-y de los pilotes de FRP y PPI se puede concluir que el EI del pilote si influye en la reacción del suelo y la forma de las curvas p-y. A medida que aumenta el EI del pilote, aumentan las reacciones del suelo y se genera menor cantidad de deflexión lateral.
2. Las reacciones del suelo aumentan al aumentar el EI del pilote porque la ubicación del punto de cero deflexión lateral se encuentra a una profundidad mayor bajo la superficie del terreno, lo que se traduce en un mayor tamaño de la cuña pasiva y una movilización mayor de un volumen de suelo, lo que genera mayores reacciones en el suelo.
3. A una deflexión lateral de 20 mm para las curvas p-y determinadas con SWM a una profundidad de 2.91 m debajo de la superficie del terreno se presenta una reacción del suelo de 220 kN/m para el pilote de FRP y 176 kN/m para el pilote de PPI, esto es una diferencia de aproximadamente 25% en la reacción del suelo para esta diferencia relativamente pequeña en rigideces (el pilote de FRP es 2.6 veces más rígido que el pilote de PPI). Este efecto debería ser más notable en arenas densas y muy densas.
4. Para arenas sueltas y ligeramente densas, como es el caso del estado de las arenas ubicadas a la profundidad a la que se determinaron estas curvas p-y, el EI del pilote tiene una influencia baja sobre la reacción del suelo y el efecto de generar mayores reacciones en el suelo según aumenta el EI del pilote se nota relativamente menos.

Al aplicar la metodología para determinar las curvas p-y desde datos de deflexión a los pilotes de prueba del caso histórico de Hampton, Virginia se pudo concluir que esta metodología no es muy adecuada para determinar curvas p-y sino mas bien para determinar el coeficiente de subrasante. Esto es porque no es posible campar la parte curva de las curvas p-y y mucho menos la reacción última del suelo. Se notó que las curvas p-y determinadas con este método no captan cuando la

reacción del suelo deja de crecer a niveles de deflexión lateral que aumentan con la carga aplicada, en otras palabras, cuando ocurre una falla del tipo flujo a través del pilote.

Estamos convencidos que el MCD es un método aproximado bastante bueno para analizar pilotes cargados lateralmente. Las curvas p-y determinadas con este método presentan ser bastantes buenas y capturan bastante bien la variación del EI del pilote. Es una metodología muy recomendable para fines de análisis de pilotes cargados lateralmente con la única desventaja de que se debe tener extremo cuidado y presentar juicio ingenieril al momento de escoger los valores de ϵ_{50} que serán utilizados en cualquier tipo de análisis, siendo este parámetro uno de los más importantes en la predicción de la cantidad de deflexión, las reacciones del suelo y por lo tanto la variación del módulo de subrasante con la profundidad.

7.4 Recomendaciones para futuras investigaciones

Como los pilotes de prueba del caso histórico no fueron definidos específicamente para esta investigación y se presentaron ligeras variaciones en los perfiles estratigráficos de los 3 pilotes, se recomiendan seguir las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones:

- Utilizar pilotes de exactamente el mismo diámetro y sección transversal de por lo menos 3 pilotes compuestos por materiales cuyos EI varíen en el rango de 10EI a 0.1EI
- Proveer suficiente instrumentación a los 3 pilotes de tal forma que se puedan determinar las curvas p-y de ambas formas, la convencional con el uso de sensores medidores de deformación y utilizando la metodología mostrada en esta tesis con el uso de inclinómetros. De esta forma las curvas p-y pueden ser comparables entre si y se puede determinar que tan buena es la determinación de las curvas p-y obtenidas desde datos de inclinómetros.
- Preparar especies de contenedores llenos de arena con diferentes densidades relativas (suelta, medianamente densa y densa), donde los pilotes serán instalados y posteriormente sometidos a pruebas de cargas laterales. Las condiciones de la prueba de carga para todos los pilotes deben ser idénticas (con excepción de las cargas), esto es, el punto de aplicación de las cargas debe ser el mismo para todos los pilotes al igual que la

altura de la cabeza del pilote sobre el nivel de la superficie del terreno, para así poder determinar las curvas p-y, y de esta forma determinar exactamente la influencia del EI sobre la reacción del suelo y las curvas p-y.

- Analizar estos pilotes de prueba utilizando SWM y comparar las curvas p-y obtenidas con este método con las obtenidas desde las pruebas de carga lateral.

También recomendamos que luego de que se obtengan las curvas p-y tomando en consideración las recomendaciones presentadas en esta sección, se presenten factores de modificación que alteren las reacciones del suelo y la forma de las curvas p-y, y la reacción última del suelo en los análisis realizados utilizando la metodología de las curvas p-y. Estos factores deben tomar en cuenta principalmente el EI del pilote y el nivel de esfuerzos, para así obtener curvas p-y teóricas que varían con las propiedades del suelo y del pilote.

Todas estas recomendaciones presentadas en esta sección pueden llevarse a cabo si se desea extender la investigación a determinar la influencia del EI del pilote sobre la reacción del suelo en suelos arcillosos. En éste caso, otras consideraciones se deben tomar en cuenta como por ejemplo realizar análisis separados para condiciones secas y saturadas, o inclusive para condiciones drenadas y no drenadas así como también para un rango representativo de consistencias del suelo.

8. REFERENCIAS

- Abdollaholiae, P. (1985). "Laterally Loaded Pile Response: Studies with the Strain Wedge Model." M. S. Thesis, University of Nevada, Reno.
- American Petroleum Institute (API). (1987). "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms." API Recommended practice 2A (RP 2A), 17th Ed.
- Ashour, M., Pilling, P., and Norris, G. (2004) "Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, June 2004, pp. 580-592.
- Ashour, M. y Norris, G. M. (2000). "Modeling Lateral Soil Response Based on Soil-Pile Interaction." *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 5, ASCE: 420-428.
- Ashour, M. (1996). *Analysis of Laterally Loaded Piles in Layered Soils Under Drained Static and Undrained Monotonic Loading*. Ph.D. Thesis, University of Nevada, Reno.
- Ashour, M., Norris, G. M., y Pilling, P. (1998a). "Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model." *Journal of geotechnical an Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 4, ASCE: 305-315.
- Ashour, M., Pilling, P., and Norris, G. (1998b). "Updated Documentation of the StrainWedge Model Program for analyzing Laterally Loaded Piles and Pile Groups." *Engineering Geology and Geotechnical Engineering Symposium*, University of Nevada, Reno, 177-178.
- Ashour, M., Norris, G., and Pilling, P. (2002) "Strain wedge model capability of analyzing behavior of laterally loaded isolated piles, drilled shafts, and pile groups." *Journal of Bridge Engineering*, 245-253.
- Ashour, M., Norris, G. M., and Elfass, S. (2006). "P-y curve based on Strain Wedge Model Analysis Compared to the Traditional p-y Curve Approach." *The 57th Highways Geology symposium*, Breckenridge, Colorado, 382-391.
- Baldi, G., Belloti R., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., and Pasqualine, E. (1986). "Flat Dilatometer Test in Calibration Chambers." *Proceedings of In Situ '86 Conference*, Blacksburg, VA, 431-446.

- Bhushan, K., Lee, L.J., y Grime, D.B. (1981). "Lateral Load Test in Drilled Piers in Sand." *Pre-Impreso de la Reunión Anual de la ASCE*, Missouri, St. Louis, 26 – 30 Octubre.
- Bolows, H.A. (1968). "Foundation Analysis and Design." McGraw Hill, 503-507.
- Briaud, J.L., Smith, T., and Meyer, B. (1984). "Laterally Loaded Piles and the Pressuremeter: Comparison of Existing Methods." *Laterally Loaded Deep Foundations*, ASTM, STP 835, 97-111.
- Broms, B.B (1964a). "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils." *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, ASCE 90(SM2), 27-36.
- Broms, B.B (1964b). "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils." *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, ASCE 90(SM3), 123-156.
- Broms, B.B (1965). "Design of Laterally Loaded Piles." *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, ASCE 91(SM3), 77-99.
- Carter, D.P. (1984). "A Nonlinear Soil Model for Predicting Lateral Pile Response." M.S. Thesis, University of Auckland, New Zealand.
- Collins, M.P., and Mitchell, D. (1997). "Prestressed concrete structures." Response Publications, Toronto, Canada.
- Fam, A. (200). "Concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes for axial and flexural structural members." Ph.D. Dissertation, University of Manitoba, Canada.
- Fan, C. C., and Long, J. H. (2005). "Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand." *Computers and Geotechnics*, Vol.32, 274-289.
- Francis, A.J. (1964). "Analysis of Pile Group With Flexural Resistance." *Proceedings*, ASCE, Vol. 90, SM3, 20-23.
- Gerber, T. M. (2003). "p-y Curves for Liquefied Sand Subject to Cyclic Loading Based on Testing of Full- Scale Deep Foundations." Ph.D. Dissertation, Brigham Young University.
- Gowda. P. (1991). "Laterally Loaded Pile Analysis for Layered Soils Bases on the Strain Wedge Model." M. S. Thesis, University of Nevada, Reno.
- Ismael, N. (1990). "Behavior of Laterally Loaded Bored Piles in Cemented Sand." *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1978-1699.

- Matlock, H. (1970). "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay" Proceedings, Second Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Vol. 1, Paper No. OTC 1204, 577-594.
- Matlock, H. and Ripperger, E.A. (1958). "Measurement of Soil Pressure on a Laterally Loaded Pile." Proceedings, ASTM, 58, 1245-1259.
- McClelland, B. and Focht, J.A. Jr. (1958). "Soil Modulus of Laterally Loaded Piles." Transactions, ASCE 123, 1049-1086
- Norris, G.M. (1986). "Theoretically Base BEF Laterally Loaded Pile Analysis." Proceedings , Third International Conference on Numerical Methods of Offshore Piling, Nantes, France, 361-386.
- Nyman, K.J. (1980). Field Load Test of Interpreted Drilled Shafts in Coral Limestone. *M.S. Thesis*, University of Austin, Texas.
- Ling, L. F. (1988). "Back Analysis of Lateral Load Tests on Piles." Report No.460, Civil Engineering Department, University of Auckland, New Zealand.
- O'Neill, M.W., and Murchison J.M. (1983). "An evaluation of p-y relationships in sand." A Report to the American Petroleum Institute, PRAC 82-41-1, The University of Houston-University Park, Houston, Texas.
- Ooi, P. S., and Ramsey, T. L. (2003). "Curvature and Bending Moment From Inclinator Data." *International Journal on Geomechanics*, Vol. 3, No. 1, ASCE, pp. 64-74.
- Pando, M.A. (2003). "A Laboratory and Field Study of Composite Piles for Bridge Substructures." *Ph.D. Dissertation*, Virginia Tech, Blacksburg, VA.
- Poulos, H. G., and Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.
- Reese, L. C., y Van Impe, W. F. (2001). "Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading". A. A. Balkema, Bookfield, VT.
- Reese, L. C. (1977). "Laterally Loaded Piles: Program Documentation." *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, GT. 4, ASCE: 287-305.
- Reese, L. C. (1983). "Behavior of Piles and Pile Group Under Lateral Load." Report to the U.S. Department of Transportation, FHWA, Washington, D.C.
- Reese, L. C. (1987). "Documentation of the Computer Program LPILE1." *ENSOFT Inc.*, P.O. Box 180348, Texas 78718.

- Reese, L. C. (1997). "Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rocks." *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123(11), ASCE: 1010-1017.
- Reese, L. C., Cox, y Koop, F. D. (1975). "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay." *Proceedings of the VII Annual Offshore Technology Conference*, II(OTC 2312), Houston, Texas, 672-690.
- Reese, L. C., y Welch, R.C. (1975). "Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay" *Journal of Geotechnical Engineering*, 101(GT7), ASCE: 633-649.
- Reese, L. C., Cox, y Koop, F. D. (1974). "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand." *Proceedings, VI Annual Offshore Technology Conference*, Houston, TX, II(OTC 2080), 473-485.
- Robertson, P.K., Davies, M.P., and Campanella, A. (1989). " SPT-CTP Design of Laterally Loaded Driven Piles Using the Flat Dilatometer." *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 12, No. 1, 30-39
- Terzaghi, K. (1955). "Evaluation of Coefficients of Subgrade Modulus." *Geotechnique*, V, 297-326.
- Vesic, A.S. (1961b). "Beams on Elastic Subgrade and the Winkler hypothesis." *Proceedings of the V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France, 545-550.
- Welch, R.C., y Reese, L. C. (1972). "Laterally Loaded Behavior of Drilled Shafts." *Research Report 3-5-65-89*, Center for Highway Research, University of Texas, Austin, TX, 1972.
- Xiao, X., and Wang, J. (2007). "DEM in 3D Simulation of Influencing Factors of deformation Properties and p-y Curves of a Laterally Loaded Pile." *Lecture Notes in Computational Sciences, Computer Science*, 1214-1222.
- Yoshida, I., and Yoshinaka, R. (1972). "A Method to Estimate Modulus of Subgrade Reaction for a Pile." *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 12, No. 3.