

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCIÓN EN ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA

Análisis Numérico y Experimental de Pilotes Excavados de Hormigón Armado Cargados Lateralmente

por
Víctor Eduardo De Napoli
Ing. Civil, UNC

Director: Dr. Carlos Alberto Prato
Profesor Plenario, UNC



Agosto de 2006

*A Dios y a mis padres, por su fiel
compañía y constante apoyo*

Agradecimientos

Ante todo, quiero agradecer a Dios por su misteriosa presencia y por los numerosos dones confiados para llevar adelante mi formación y desarrollar este trabajo.

Deseo expresar un profundo agradecimiento a mi estimado director de tesis, el Dr. Carlos A. Prato, por su dedicación, compromiso, motivación, y orientación que contribuyeron significativamente a la realización de mi tesis de maestría.

También, al Departamento de Estructuras, y en especial a su Director, el Ing. Gérald Pirard, por haberme brindado un lugar y las herramientas de trabajo, pero sobre todo, por haberme hecho sentir parte de este hermoso grupo de personas.

Al Ing. Roberto Terzariol, por haber facilitado gentilmente los pilotes utilizados en la fase experimental de este trabajo. Al Dr. Marcelo Ceballos, por su colaboración y predisposición en la ejecución de los ensayos dinámicos realizados. Al laboratorio del Departamento de Estructuras, y muy especialmente a Marcelo Tissera, por su abocada colaboración y participación en las pruebas de carga lateral sobre los pilotes.

A los profesores y compañeros de maestría, por su amistad y porque de alguna u otra manera acompañaron este proceso. En especial a Carlos Estrada y Guillermo Gerbaudo, con los que compartí un lugar de trabajo y con los que cultive una hermosa amistad. A Carlos Gerbaudo, Pablo Brizuela y Diego Hünicken, por su estímulo y amistad.

A la Secretaría de Extensión de la Universidad Nacional de Córdoba por haber apoyado económicamente con una Beca de Maestría parte de este trabajo y al Colegio de Ingenieros Civiles de la Provincia de Córdoba por la Media Beca otorgada que permitió reducir significativamente los costos de estudio.

A mis padres, familia y amigos, que por tratarse de un documento académico no fueron citados con anterioridad, les agradezco su comprensión y aliento. A mi novia por su amorosa compañía y su dulce presencia.

A los Ing. Alfredo Payer y Ricardo Rocca por su constante interés y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A los Dr. Federico Pinto y Juan Clariá, por generosa predisposición para facilitarme material bibliográfico, atender consultas y evacuar dudas.

A la Lic. Cristina Dalmagro, por su valiosísima revisión del trabajo y a Ramiro Fernández, por sus sugerencias sobre la edición del documento.

Por definición, gratitud es el sentimiento que nos obliga a estimar el beneficio o favor que se nos ha hecho o ha querido hacer, y a corresponder a él de alguna manera. Invasado por este sentimiento, les expreso mi profundo agradecimiento y deseo de que Dios los bendiga.

Índice

Introducción	10
1.1 Presentación del tema de estudio	10
1.2 Justificación	11
1.3 Alcance	14
1.4 Objetivos	14
1.5 Metodología	15
1.6 Organización del trabajo	17
Análisis Dinámico Lineal	20
2.1 Introducción	20
2.2 Análisis numérico	21
2.2.1 Ecuación de movimiento del sistema suelo-pilote	21
2.2.2 Descripción del modelo lineal	21
2.2.3 Rigidez del sistema suelo-pilote	23
2.2.4 Masa del sistema suelo-pilote	36
2.2.5 Amortiguamiento del sistema suelo-pilote	37
2.2.6 Análisis en el dominio de la frecuencia	45
2.3 Análisis experimental	46
2.3.1 Descripción y características de los ensayos	47
2.4 Comentarios finales	50

Ensayos de Carga Dinámica	52
3.1 introducción	52
3.2 Descripción y preparación de los pilotes	53
3.3 Descripción del equipo	54
3.4 Ejecución de los ensayos de carga dinámica	55
3.5 Análisis y presentación de los resultados	57
3.6 Discusión de los resultados	68
3.7 Comentarios finales	75
Análisis Numérico Dinámico Lineal	76
4.1 Introducción	76
4.2 Descripción del modelo lineal	77
4.2.1 Modelo lineal de elementos finitos	77
4.2.2 Rigidez flexional y masa del pilote	78
4.2.3 Módulo de Young E_P de los pilotes	79
4.2.4 Módulo de Young E_S del suelo	83
4.3 Rigidez del suelo y amortiguamiento por radiación del sistema suelo-pilote	90
4.3.1 Resortes y amortiguadores equivalentes según Gazetas y Dobry	90
4.3.2 Resortes y amortiguadores equivalentes según Novak et al.	95
4.3.3 Resortes y amortiguadores equivalentes según Novak y Aboul-Ella	101
4.4 Discusión de los resultados	105
4.4.1 Curvas de rigidez dinámica	105
4.4.2 Comparación con la solución estática para un medio continuo	113
4.5 Comentarios finales	117
Análisis Estático No Lineal	119
5.1 Introducción	119
5.2 Modelo no lineal del sistema suelo-pilote	121
5.3 Comportamiento no lineal del suelo	123
5.3.1 Método $p-y$	123
5.3.2 Modelo no lineal de un estrato de suelo	127
5.3.3 Curvas $p-y$ para arcillas (Reese y Welch)	137

5.3.4	Verificación de curvas p - y del modelo plano	139
5.4	Capacidad de carga lateral de pilotes.....	148
5.4.1	Resistencia lateral del pilote según Broms	149
5.4.2	Método de la Carga Característica.....	151
5.4.3	Análisis p - y . Curvas propuestas por Reese y Welch	155
5.4.4	Análisis p - y . Curvas determinadas con el modelo plano.....	157
5.5	Comportamiento no lineal de pilotes.....	161
5.6	Comentarios finales	167
Análisis Estático No Lineal de los Pilotes Ensayados		170
6.1	Introducción.....	170
6.2	Pilotes experimentales y modelo no lineal	171
6.3	Curvas p - y de los estratos de suelo	173
6.4	Diagrama M - χ de los pilotes.....	178
6.4.1	Calibración de las rótulas plásticas.....	182
6.5	Comportamiento frente a cargas laterales estáticas	185
6.5.1	Análisis Estático Lineal	185
6.5.2	Análisis Estático No Lineal (pilote E y suelo NL).....	186
6.5.3	Análisis Estático No Lineal (pilote NL y suelo NL)	190
6.6	Comentarios finales	200
Ensayos de Carga Estática		203
7.1	Introducción.....	203
7.2	Descripción y preparación del ensayo	204
7.3	Ejecución del ensayo	209
7.3.1	Rotura del pilote $P2D35$	212
7.4	Presentación y discusión de los resultados	215
7.4.1	Resultados experimentales	215
7.4.2	Comparación con los resultados numéricos	219
7.4.3	Análisis con las curvas p - y definidas según Reese.....	224
7.4.4	Influencia de la rigidez flexional de los pilotes.....	229
7.5	Comentarios finales	232

Conclusiones	236
8.1 General.....	236
8.1.1 Respuesta dinámica lineal	236
8.1.2 Respuesta estática no lineal	238
8.2 Posible continuación de este trabajo.....	239
Ensayos de propagación de ondas en el hormigón y en el suelo	241
Curvas <i>p-y</i> de los estratos de suelo	248
Ensayos de carga lateral estática	254
Referencias Bibliográficas	256

Capítulo 1

Introducción

1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA DE ESTUDIO

La respuesta de pilotes frente a cargas laterales estáticas o dinámicas es un aspecto de singular importancia en el análisis de fundaciones profundas. Numerosos trabajos publicados por importantes investigadores durante los últimos 35 años ponen en evidencia el interés en el estudio de este comportamiento, cuya determinación implica resolver un problema de interacción entre el suelo y el pilote regido principalmente por la naturaleza y la magnitud de las sollicitaciones laterales.

La reacción lateral del suelo y la resistencia flexional del pilote son funciones lineales de las deformaciones dentro del campo lineal elástico, pero al aumentar la magnitud de las sollicitaciones, y por lo tanto las deformaciones, el sistema manifiesta un comportamiento inelástico debido tanto a la no linealidad del suelo y del pilote cuanto a la modificación del contacto efectivo entre ambos.

Además, frente a cargas dinámicas, la respuesta del pilote generalmente se encuentra desfasada de la sollicitación por causa de la inercia de las masas movilizadas y por los distintos mecanismos de amortiguamiento del sistema. Dicho amortiguamiento representa las fuerzas viscosas que actúan sobre el pilote y sus componentes principales son el amortiguamiento por radiación del sistema y el amortiguamiento material del pilote y del suelo. El primero tiene su origen en la irradiación de ondas desde la interfaz suelo-pilote,

que se propagan a través del suelo hacia el infinito sin retornar al pilote, mientras que el segundo considera la disipación de energía debida al rozamiento intergranular producido durante la deformación del hormigón y del suelo. Ambos tipos de amortiguamientos, al igual que la rigidez lateral del suelo, varían con la frecuencia de excitación. Habitualmente, en un análisis dinámico, la inercia de la masa del pilote se considera de manera explícita, mientras que la masa del suelo se tiene en cuenta a través de la rigidez dinámica compleja del suelo circundante, expresada en forma de amortiguamiento por radiación. La rigidez, el amortiguamiento y la masa del sistema suelo-pilote constituyen la rigidez dinámica del pilote dependiente de la frecuencia de excitación.

Analizar el comportamiento de pilotes frente a cargas laterales estáticas o dinámicas requiere dar solución a un problema de interacción entre el suelo y el pilote, cuya complejidad depende de la amplitud de las cargas y de su variación a través del tiempo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Frecuentemente es necesario analizar la respuesta de pilotes solicitados por cargas laterales dentro del campo lineal elástico. Un ejemplo de esta situación es el caso de fundaciones de máquinas, donde, si bien éstas transmiten excitaciones con un contenido de frecuencias diverso, en general no producen grandes deformaciones.

Es habitual analizar el comportamiento de pilotes frente a cargas laterales con un modelo de barras restringidas lateralmente por apoyos independientes que representan diferentes estratos de suelo (modelo de viga sobre un apoyo tipo Winkler). En un análisis dinámico lineal estos apoyos están constituidos por resortes y amortiguadores desacoplados que representan de manera aproximada las fuerzas elásticas y viscosas asociadas al suelo que actúan sobre el pilote. Los coeficientes de los resortes equivalentes se determinan, en general, a partir de la rigidez de un semi-espacio bajo un estado plano de deformaciones con una inclusión rígida. Para pequeñas deformaciones es usual despreciar el amortiguamiento material, determinando los coeficientes de los amortiguadores

equivalentes con modelos aproximados basados en el concepto de propagación de ondas a través de un medio visco-elástico con borde al infinito, también bajo un estado plano de deformaciones.

En la bibliografía de referencia consultada se desarrollan diversas formulaciones para definir la rigidez y el amortiguamiento de un estrato suelo, pero al analizar numéricamente el comportamiento de pilotes elásticos frente a cargas laterales dinámicas se observan diferencias significativas entre los resultados de las distintas formulaciones. La incertidumbre sobre el modelo que mejor aproxima un caso real motiva a profundizar el estudio de la respuesta lineal de pilotes frente a este tipo de solicitaciones y a desarrollar un plan de ensayos para determinar la rigidez dinámica de pilotes de prueba que permita verificar la precisión de las formulaciones consideradas.

Por otra parte, el análisis de pilotes sometidos a cargas laterales cuyo comportamiento excede el campo lineal se basa principalmente en el “Método $p-y$ ”, que considera el comportamiento no lineal del suelo mediante leyes constitutivas obtenidas a partir de numerosos estudios experimentales. Estas curvas $p-y$ de naturaleza empírica, en general, sólo dependen de parámetros del suelo tales como la resistencia al corte no drenada, en el caso de arcillas, y el ángulo de fricción interna, para el caso de arenas. En un análisis no lineal también es habitual emplear un modelo de barras restringidas lateralmente por apoyos tipo Winkler, donde se considera la reacción lateral del suelo a través de resortes no lineales independientes calibrados según las curvas $p-y$ de los correspondientes estratos.

Los manuales de diseño de pilotes y pozos excavados consultados, como por ejemplo el de la *Federal Highway Administration*, presentan curvas $p-y$ para el caso de suelos cohesivos sin fricción, o friccionales sin cohesión, pero no así para suelos con parámetros cohesivos y friccionales como el caso de suelos loésicos. Además, estas curvas especifican aproximadamente la capacidad última del suelo, pero no definen con suficiente precisión la rigidez inicial correspondiente a pequeñas deformaciones. En el presente trabajo se proponen curvas $p-y$ apropiadas para el análisis de pilotes sometidos a cargas laterales monótonamente crecientes, obtenidas con un modelo bidimensional de elementos

finitos que representa de manera aproximada un estrato de suelo bajo un estado plano de deformaciones. Este modelo permite imponer el ajuste de la rigidez inicial y considerar modelos constitutivos apropiados para representar el comportamiento inelástico de distintos tipos de suelo.

El Método $p-y$ considera que el pilote permanece elástico hasta que se alcanza el momento de fluencia en alguna sección transversal del pilote, pero no contempla la disminución de rigidez flexional debida a la fisuración del hormigón ni el comportamiento dúctil que puede experimentar una pieza de hormigón armado sometida a esfuerzos de flexión más allá de la fluencia de las barras de acero. En este trabajo se analiza el comportamiento de pilotes frente a cargas laterales monótonamente crecientes, incorporando en el análisis la fisuración del hormigón y la ductilidad rotacional del pilote mediante articulaciones capaces de deformarse plásticamente (*frame hinges*), calibradas a partir del diagrama $M-\chi$ del pilote.

Debido a las importantes incertidumbres existentes en este tipo de problemas con respecto a los parámetros elásticos y resistentes, del suelo y del pilote, se considera conveniente la realización de ensayos de capacidad de carga lateral estática para verificar las estimaciones obtenidas numéricamente y calibrar los parámetros adoptados en el modelo.

Resulta evidente que la estimación del comportamiento mecánico lineal y no lineal de pilotes sometidos a sollicitaciones laterales estáticas o dinámicas es un aspecto de singular importancia en el análisis de fundaciones profundas, cuya complejidad requiere un conocimiento acabado de los diversos aspectos involucrados. Por todo lo expuesto, se considera de gran interés llevar a cabo un estudio numérico-experimental del comportamiento lineal y no lineal de pilotes de hormigón armado, excavados y llenados in-situ, frente a cargas laterales.

1.3 ALCANCE

En este trabajo se analizan dos casos cuya justificación se expuso anteriormente. En primer lugar, se considera el análisis de pilotes solicitados lateralmente por acciones estáticas o dinámicas de magnitud tal que sólo producen pequeñas deformaciones, permaneciendo el pilote y el suelo dentro del campo lineal elástico. También se analiza el caso de pilotes solicitados lateralmente por cargas estáticas monótonamente crecientes que producen grandes deformaciones inelásticas hasta desencadenar la falla del pilote.

Se analiza solamente el caso de pilotes aislados de hormigón armado excavados en un perfil de suelos uniforme o estratificado. No se consideran pilotes hincados debido a las incertidumbres relacionadas con el estado de tensiones del suelo producido por la hincada de los pilotes. A pesar de reconocer la importancia en aplicaciones prácticas de la fundación mediante grupos de pilotes, en el presente trabajo no se tiene en cuenta el efecto de grupo en ninguno de los análisis realizados. En todos los casos se supone que la sollicitación axial del pilote no modifica su comportamiento frente a las cargas laterales.

El modelo numérico utilizado supone la existencia de estratos horizontales cuyas propiedades mecánicas y resistentes se consideran constantes dentro de cada estrato, pero pueden variar con respecto a los otros. Esto es así tanto para la determinación de la reacción lateral del suelo como para el amortiguamiento por radiación. El análisis también es apropiado para pilotes de hormigón armado de cualquier forma seccional y distribución de armadura longitudinal.

1.4 OBJETIVOS

- i) Analizar numéricamente la respuesta lineal de pilotes de prueba frente a cargas laterales estáticas o dinámicas, considerando diferentes formulaciones expuestas en la bibliografía para representar aproximadamente las fuerzas elásticas y viscosas asociadas al suelo que actúan sobre los pilotes.

- ii) Determinar experimentalmente la rigidez dinámica de pilotes de prueba para comparar los resultados empíricos y numéricos y verificar las diferentes formulaciones consideradas al definir los resortes y amortiguadores equivalentes del modelo lineal.
- iii) Predecir numéricamente el comportamiento no lineal de pilotes de hormigón armado, excavados y hormigonados in-situ, frente a cargas laterales estáticas monótonamente crecientes, empleando un modelo de barras y apoyos no lineales independientes capaz de representar la reacción elasto-plástica del suelo y la ductilidad rotacional de los pilotes.
- iv) Determinar las curvas $p-y$ de los resortes no lineales utilizando un modelo bidimensional bajo un estado plano de deformaciones y leyes constitutivas adecuadas para caracterizar el comportamiento elasto-plástico del suelo de los distintos estratos. Además, definir numéricamente el diagramas $M-\chi$ de los pilotes considerando las propiedades mecánicas y resistentes del hormigón y del acero.
- v) Ejecutar ensayos de carga lateral estática sobre pilotes de prueba para comparar los resultados experimentales y numéricos y verificar la aptitud del modelo no lineal para predecir el comportamiento de pilotes frente a cargas laterales estáticas monótonamente crecientes.

1.5 METODOLOGÍA

Con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos se divide el trabajo en dos secciones. En la primera se desarrolla el análisis numérico-experimental para estudiar la respuesta de pilotes frente a cargas laterales, estáticas o dinámicas, dentro del campo lineal elástico. La segunda parte corresponde al análisis estático no lineal de pilotes solicitados lateralmente por cargas monótonamente crecientes.

En el análisis dinámico lineal de pilotes se recurre al método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de movimiento con múltiples grados de libertad del modelo de barras elásticas restringidas lateralmente por resortes y amortiguadores equivalentes. Los coeficientes de los vínculos elásticos y viscosos se determinan a partir de diversas formulaciones ya establecidas en la bibliografía de referencia. Empleando la herramienta computacional MATLAB se programan rutinas para resolver el sistema de ecuaciones y calcular la rigidez dinámica de los pilotes.

En la fase experimental se realizan ensayos dinámicos no destructivos para determinar la rigidez dinámica de pilotes a partir del comportamiento frente a un impulso lateral de pequeña amplitud. Mediante estimadores dependientes de las densidades espectrales directas y cruzadas de los registros del ensayo se determina la función de coherencia utilizada para verificar la linealidad del sistema y la Función de Transferencia entre la excitación y la respuesta, cuya inversa es la rigidez dinámica del pilote. A partir de la comparación de los resultados numéricos y experimentales se verifican las formulaciones consideradas, siendo posible, además, calibrar los parámetros elásticos del modelo para mejorar el ajuste logrado.

El análisis estático no lineal consiste en resolver, mediante el método de elementos finitos, el sistema de ecuaciones de equilibrio del sistema suelo-pilote, llevando a cabo un análisis numérico que considera la variación de la rigidez del suelo y del pilote en función de las deformaciones experimentadas. Se propone un modelo similar al utilizado en el análisis lineal, pero en este caso se definen resortes no lineales ajustados con las curvas $p-y$ de los diferentes estratos de suelo y rótulas plásticas calibradas a partir del diagrama $M-\chi$ del pilote. Las curvas $p-y$ se determinan con un modelo bidimensional aproximado de un estrato de suelo, mientras que los diagramas $M-\chi$ se definen a partir de la resistencia flexional de una sección transversal del pilote para diferentes planos de deformación específica.

El comportamiento de pilotes frente a cargas laterales monótonamente crecientes se determina mediante un análisis estático no lineal a desplazamiento controlado realizado

con la ayuda del programa de elementos finitos SAP2000. Posteriormente se llevan a cabo ensayos de carga lateral con pilotes de prueba para comparar los resultados experimentales con los numéricos y verificar la capacidad del modelo para predecir el comportamiento inelástico del sistema suelo-pilote.

1.6 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

De acuerdo con la metodología propuesta, el presente trabajo consta de dos partes. La primera corresponde al análisis dinámico lineal de pilotes solicitados lateralmente, cuyos diferentes aspectos se desarrollan en los capítulos 2, 3 y 4, mientras que la segunda parte se refiere al análisis estático no lineal frente a cargas laterales y abarca los capítulos 5, 6 y 7.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo lineal empleado para resolver el sistema de ecuaciones de movimiento del sistema suelo-pilote, se exponen diferentes formulaciones ya establecidas en la bibliografía de referencia para definir los vínculos elásticos y viscosos del modelo y, además, se describen los ensayos dinámicos no destructivos propuestos para determinar la rigidez dinámica de pilotes experimentales.

En el Capítulo 3 se describe la ejecución de ensayos de carga dinámica llevados a cabo sobre una serie de pilotes de prueba y se presentan las curvas de rigidez dinámica obtenidas. A partir de los resultados empíricos se analiza la influencia de los parámetros elásticos y geométricos del sistema en la respuesta dinámica de pilotes con características similares.

En el Capítulo 4 se exponen los resultados del análisis numérico mediante el cual se determina la rigidez dinámica de los pilotes ensayados, considerando los resortes y amortiguadores equivalentes definidos por las diferentes formulaciones consideradas. Posteriormente, se comparan los resultados numéricos y experimentales con el propósito de verificar la aproximación lograda con las distintas formulaciones y ajustar los parámetros elásticos del modelo.

En el Capítulo 5 se desarrolla el análisis estático no lineal de pilotes cargados lateralmente y se presenta el modelo de elementos finitos utilizado para resolver el sistema de ecuaciones de equilibrio. Asimismo, se describe el modelo plano propuesto para definir el comportamiento elasto-plástico del suelo, cuyas curvas $p-y$ se comparan con las sugeridas por Reese y Welch para el caso de arcillas. Además, se describe el procedimiento numérico para determinar los diagramas $M-\chi$ de los pilotes, cuyos resultados se comparan con ejemplos verificados experimentalmente por Park y Paulay. Finalmente, se describe el análisis estático no lineal mediante el cual se determina numéricamente el comportamiento inelástico de pilotes frente a cargas laterales monótonamente crecientes.

En el Capítulo 6 se desarrolla el análisis numérico no lineal de dos pilotes de hormigón armado, sometidos posteriormente a ensayos de carga lateral estática. Se definen las curvas $p-y$ de los diferentes estratos de suelo y se determinan los diagramas $M-\chi$ de los pilotes. Finalmente, se presentan diversos resultados del análisis numérico.

En el Capítulo 7 se describe la ejecución de ensayos de carga lateral realizados con los pilotes de pruebas analizados numéricamente. Los resultados experimentales se comparan con los numéricos con el propósito de verificar la capacidad del modelo para predecir el comportamiento inelástico del sistema suelo-pilote.

Por último, en el Capítulo 8 se presentan las principales conclusiones de la investigación documentada en este trabajo. Una parte significativa de los datos y registros del presente estudio se adjuntan al final en los distintos apéndices.