

DETERMINACIÓN DE CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN AXIAL PARA PILOTES EXCAVADOS A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO CON RESULTADOS DE ENSAYOS DINÁMICOS

Paul Hernán Kohan^a, Carlos A. Prato^b y Federico Pinto^a

^aUniversidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina, paulkohan@unsa.edu.ar

^bUniversidad Nacional de Córdoba, Avda. Vélez Sarsfield 1611 Córdoba, Argentina

Palabras Clave: pilotes excavados, fundaciones profundas, movilidad, rigidez.

Resumen. La correcta definición de la relación carga vs. asentamiento de pilotes excavados bajo carga axial constituye un dato de gran importancia para el diseño de diversos proyectos estructurales. En este trabajo se propone predecir este comportamiento a partir de un modelo numérico del sistema suelo-pilote calibrado con resultados de ensayos dinámicos. Con este fin, se propone realizar el ajuste de los parámetros de un modelo de elementos finitos con los datos obtenidos de ensayos en los que se producen golpes de distintas intensidades en la cabeza del pilote. Con los resultados de los ensayos con golpes de baja intensidad es posible calibrar los parámetros relacionados con la rigidez inicial del sistema suelo-pilote y, con los golpes de mayor intensidad, los parámetros relacionados con la respuesta una vez superada las deformaciones iniciales. En lo que se refiere a la implementación computacional en elementos finitos, se propone analizar los resultados obtenidos utilizando para el suelo el modelo constitutivo Mohr-Coulomb y el de Duncan y Chang. Finalmente, se realiza la validación del modelo numérico y del procedimiento de calibración mediante una comparación de los resultados obtenidos de la implementación computacional y resultados experimentales.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad las fundaciones de muchas estructuras se resuelven utilizando pilotes, entre otras razones por la necesidad de llegar a suelos más competentes o para evitar desplazamientos excesivos. Los procedimientos de diseño comúnmente empleados para estos pilotes implican principalmente la determinación de su capacidad de carga y, en algunos casos, la estimación de la rigidez inicial a través de modelos y fórmulas aproximadas. En general, estos procedimientos no permiten definir la relación carga vs. desplazamiento del pilote que tiene gran influencia en el comportamiento de la estructura principal. Las incertidumbres generadas por esta falta de información son cubiertas mediante la introducción de coeficientes de seguridad.

Este trabajo está orientado al desarrollo de modelos en elementos finitos que permitan una predicción más racional del comportamiento de los pilotes en las etapas de diseño o evaluar el desempeño de los elementos construidos. Esta opción de análisis implica la utilización de un modelo constitutivo para representar el comportamiento del suelo. En las últimas décadas se han desarrollado modelos con diferentes niveles de sofisticación que permiten aproximar la respuesta del suelo a las sollicitaciones producidas por distintos tipos de fundaciones. Pero este mayor nivel de complejidad implica la definición de una mayor cantidad de propiedades de los materiales que no siempre están al alcance del proyectista y también una mayor dificultad en su implementación en programas computacionales. En este sentido los modelos de Mohr-Coulomb y el modelo hiperbólico propuesto por Duncan y Chang (1970) resultan ventajosos ya que la simplicidad de su definición permite implementarlo de manera sencilla en un programa de elementos finitos.

En la definición de los modelos numéricos de pilotes debe tenerse en cuenta que los procesos constructivos relacionados a la instalación de pilotes pueden producir variaciones en las propiedades del suelo, y lógicamente esto puede resultar en diferencias entre el comportamiento esperado y el real. Por esta razón en la práctica ingenieril resultan necesarios procedimientos que permitan evaluar el comportamiento de estos elementos estructurales una vez construidos. Una alternativa común es la utilización de ensayos in situ de carga estática, pero estos consumen mucho tiempo y generalmente son muy costosos. En este sentido los ensayos dinámicos resultan una alternativa atractiva al evitar estos inconvenientes y también porque las mediciones se realizan a partir de procedimientos no destructivos.

Es posible clasificar los ensayos dinámicos según el nivel de deformaciones que implican. En general se puede considerar que los ensayos de bajas deformaciones están orientados a la evaluación de la integridad de los pilotes mientras que los de grandes deformaciones permiten estimar la capacidad de carga de los mismos. Otra característica que los diferencia es que los primeros requieren la utilización de equipos más simples, económicos y de fácil manejo que los segundos. Teniendo en cuenta estas razones resulta atractivo desarrollar metodologías que permitan estimar la curva carga vs. desplazamiento y la capacidad de carga de los pilotes utilizando los datos obtenidos de ensayos dinámicos en bajas deformaciones. Con este objetivo, en este trabajo se propone profundizar en los procedimientos de calibración descritos por Caballero (2007) para ajustar el modelo numérico propuesto a partir de los resultados de ensayos de baja deformaciones y su interpretación a partir del método de respuesta transitoria (TRM).

Como parte del presente trabajo se ha desarrollado un programa de elementos finitos que permite analizar problemas estáticos y dinámicos siguiendo los lineamientos indicados en Hinton y Owen (1980). Para poder representar el comportamiento no lineal de suelo se han implementado los modelos de Mohr-Coulomb y como el modelo hiperbólico de Duncan y

Chang. En las siguientes secciones se utiliza este programa para analizar el comportamiento de pilotes bajo cargas estáticas y dinámicas, representar la respuesta de un pilote a un ensayo del tipo TRM y por último obtener un modelo de pilote calibrado según la metodología propuesta por Caballero (2007) sobre un caso de real.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADO

Con el fin de analizar el comportamiento del sistema suelo-pilote bajo la acción de cargas estáticas o dinámicas se ha desarrollado un modelo en elementos finitos cuyas características principales se describen a continuación.

Teniendo en cuenta las particularidades del problema se optó por la utilización de un modelo compuesto de elementos finitos isoparamétricos, de cuatro nodos, axisimétricos. A modo de ejemplo la figura Figura 1 presenta malla utilizada en el caso del pilote de Limellete que se discute en las siguientes secciones. En este modelo se asume una sección de pilote circular. El tamaño del dominio se definió lo suficientemente grande para evitar la reflexión en los contornos de las ondas de presión dentro del intervalo de tiempo de interés (Liao y Roesset 1997).

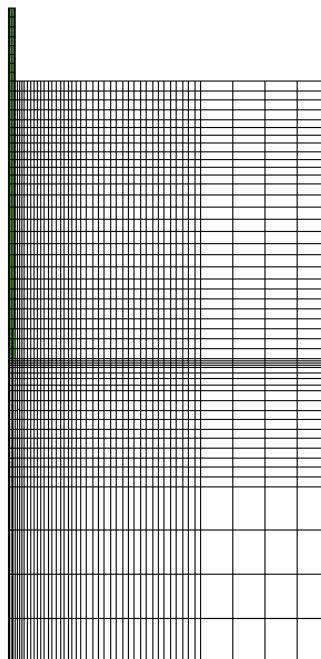


Figura 1. Malla utilizada en el estudio del pilote de Limellete

En diversas publicaciones consultadas sobre el modelado en elementos finitos de pilotes hincados y excavados se utilizan elementos de contacto del tipo friccional a lo largo de la interface suelo-pilote para simular el desplazamiento entre elementos de suelo y pilote adyacentes. Sin embargo, observaciones de campo muestran que en el caso de pilotes excavados la superficie de falla no se desarrolla exactamente en la interface sino a una cierta distancia dentro del volumen del suelo (Wang & Sitar 2011). Por esta razón, en el presente

análisis, los elementos del suelo y del pilote se asumieron perfectamente unidos, de manera que la superficie de falla se desarrolla en los elementos en la zona adyacente al fuste debido al comportamiento no lineal de los modelos constitutivos utilizados. El tamaño de los elementos se definió a partir de un estudio de sensibilidad en el que se compararon resultados con mallas sucesivamente más finas hasta que se alcanzó una convergencia razonable en la respuesta.

3 DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ INICIAL A PARTIR DE ENSAYOS DINÁMICOS DE BAJA DEFORMACIONES

3.1 Método de respuesta transitoria (TRM)

El método de respuesta transitoria, también denominado método de admitancia mecánica (Mechanical Admittance Method, Liao y Roesset 1997), de impulso-respuesta (impulse-response) o de movilidad sónica (Sonic mobility, Hertlein y Davis 2006), se basa en la interpretación de la respuesta de un pilote a la aplicación de una carga tipo impulsiva. El método consiste en aplicar una fuerza en la cabeza de un pilote a partir del impacto producido por una masa, adquiriendo registros en el tiempo de la fuerza de impacto y de la correspondiente velocidad de respuesta. Estos registros son transformados al dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) para obtener la curva de movilidad o de admitancia mecánica que es igual a,

$$M = |V/F| \quad (1)$$

donde V y F son los valores complejos de las Transformadas de Fourier de la velocidad y la fuerza de impacto correspondientes a cada frecuencia y donde el operador $||$ representa el módulo. La Figura 2 muestra un ejemplo de una curva de movilidad correspondiente a un pilote en suelo homogéneo. Esta curva es comúnmente utilizada para analizar la integridad del pilote a partir de las relaciones que se presentan.

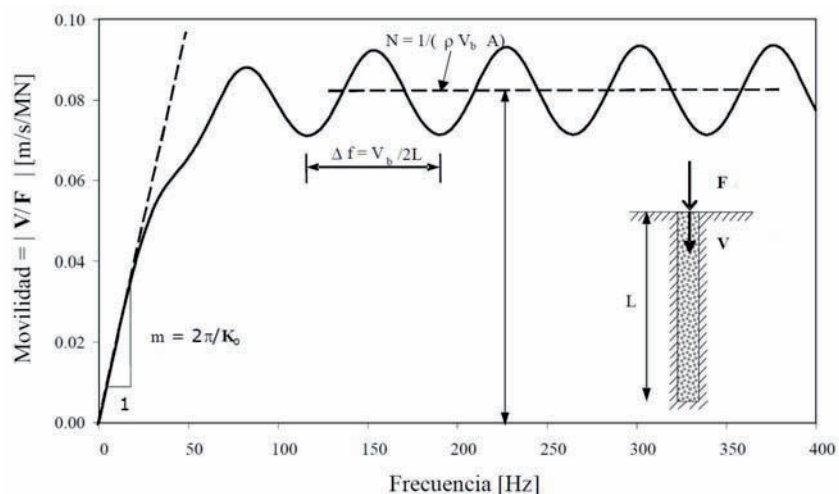


Figura 2. Curva de movilidad

Cuando el pilote es excitado a frecuencias bajas, los efectos inerciales son despreciables y el sistema suelo-pilote, comportándose como un resorte, genera una respuesta en forma de

línea recta al inicio de la curva de movilidad. La inversa de la pendiente de esta línea recta mide la rigidez dinámica de la cabeza del pilote. Davis y Dunn (1974) sugirieron que existe una relación entre la rigidez dinámica medida el método de impulso-respuesta y la rigidez inicial deducida de la parte inicial de una curva carga-asentamiento de un ensayo de carga estática. Si bien no definieron una correlación entre ambas, postularon que la rigidez dinámica es mayor que la estática y que la relación entre ambas puede llegar a valores cercanos a 1.5 (Hertlein y Davis 2006).

3.2 Comparación con resultados de Liao and Roesset

Laio y Roesset (1997) presentan los resultados de la modelación numérica del ensayo de respuesta transitoria sobre el pilote que se presenta en la Figura 3. El pilote es supuesto de hormigón y como se aprecia el pilote está parcialmente embebido en el suelo. Su sección es circular con un radio r_p . Las longitudes del pilote por encima y por debajo del nivel de terreno natural son $H_T = 1\text{m}$ y $H_B = 11\text{m}$, respectivamente, de manera que la longitud total es $L = 12\text{m}$. Se supone que un impacto es aplicado en la cabeza del pilote sobre un área circular de radio $r_L = 2.5\text{cm}$. El impacto produce una presión que varía en el tiempo definiendo medio ciclo sinusoidal como se aprecia en la Figura 4. Con el fin de validar la implementación del programa de elementos finitos utilizados en este trabajo se comparan en esta sección los resultados obtenidos sobre el mismo problema.

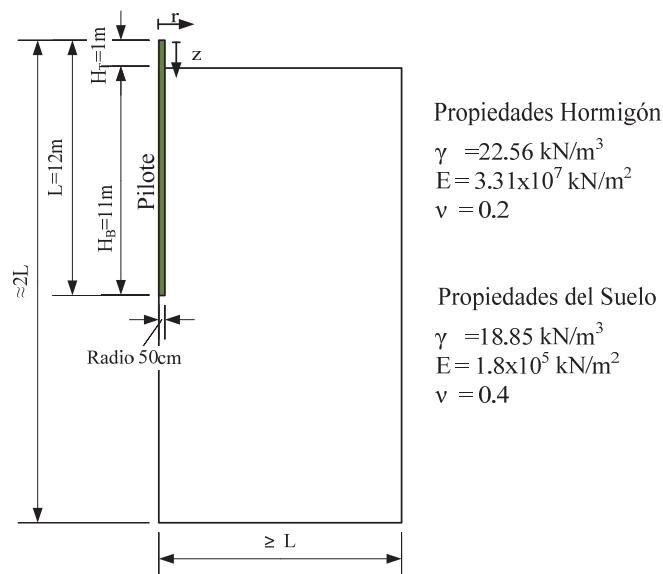


Figura 3. Configuración geométrica y propiedades del suelo para el pilote estudiado por Liao y Roesset

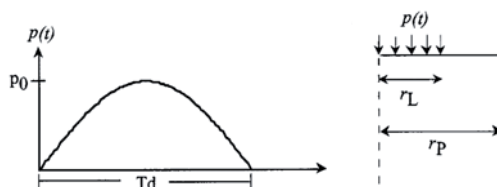


Figura 4. Funcion de carga impulsiva

La Figura 5 muestra la velocidad medida en la cabeza del pilote, una distancia de 40cm de

su centro, obtenida a partir del programa de elementos finitos propuesto. En la misma figura se presenta la misma señal pero descartando o filtrando las componentes correspondientes a frecuencias mayores a 1000Hz. La Figura 6 compara la velocidad obtenida en el presente trabajo con la presentada por Liao y Roesset, ambas filtradas. Se aprecia que los resultados obtenidos aproximan correctamente los publicados por Liao y Roesset.

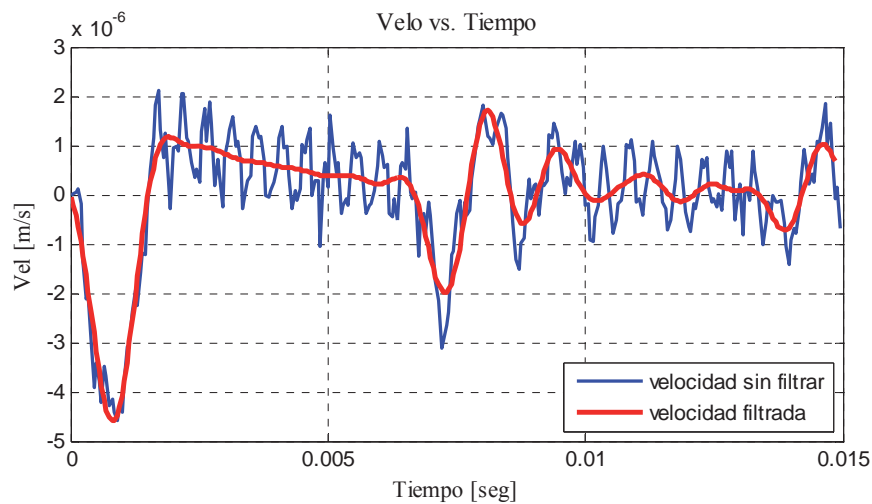


Figura 5. Cuvas velocidad vs tiempo original y filtrada

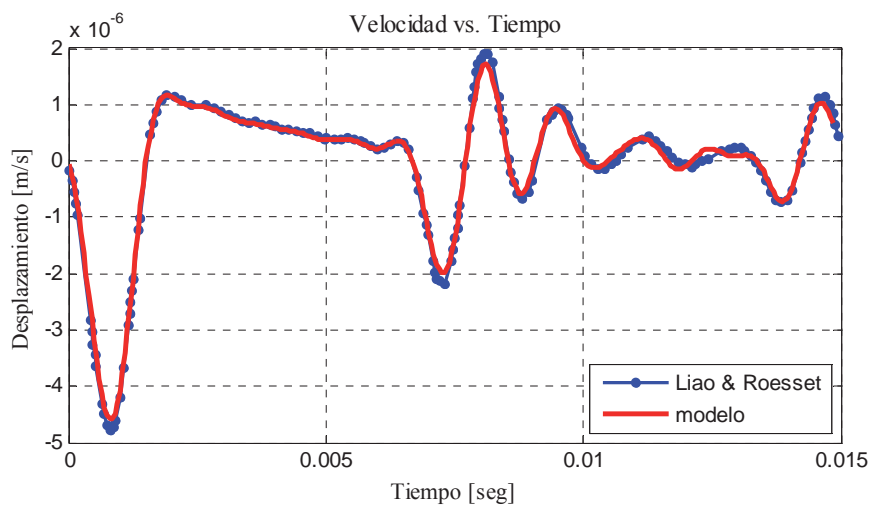


Figura 6. Comparación de velocidades obtenidas del modelo con las presentadas por Liao y Roesset

En la Figura 7 se presenta la curva de movilidad correspondiente al ejemplo en estudio calculada a partir de los resultados obtenidos en este trabajo. La longitud del pilote puede determinarse a partir de los picos en la zona resonante de la curva. Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación de onda en el pilote es 3790 m/s, resulta que según este ejemplo numérico la longitud del pilote es igual a 12.4m lo que implica un error de 3.3% respecto a la longitud original del modelo.

La rigidez dinámica obtenida a partir de la pendiente inicial de la curva de movilidad es

igual a 1.712×10^6 kN/m. Utilizando el mismo modelo de elementos finito se obtuvo la curva carga-asentamiento correspondiente a la simulación de un ensayo estático a partir de la que se determinó una rigidez estática inicial igual a 1.333×10^6 kN/m (Figura 8). La relación entre ambas rigideces es igual a 1.28.

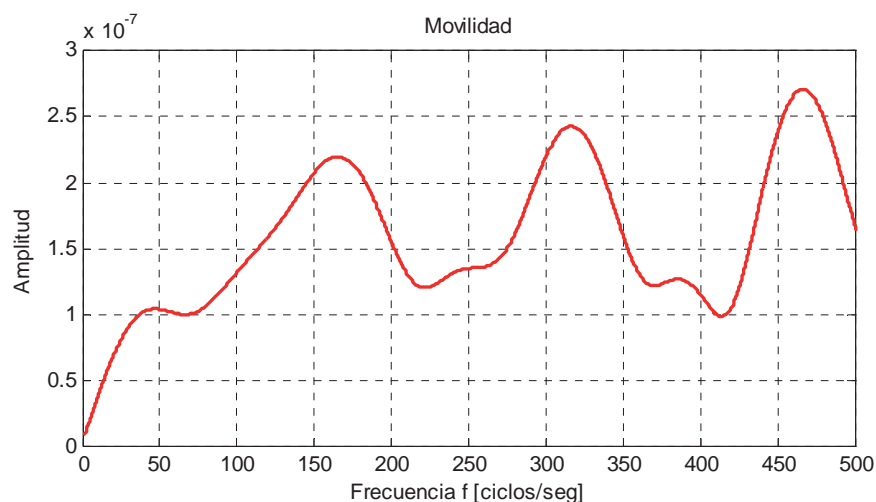


Figura 7. Curva de movilidad del sistema suelo-pilote

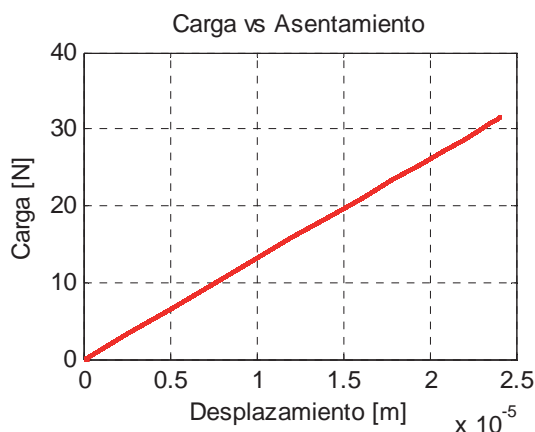


Figura 8. Carga vs desplazamientos del pilote a partir de una simulación de carga estática

4 PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTÁTICO DE PILOTES

Caballero (2007) propone predecir la curva carga-asentamiento de un pilote a partir de los resultados obtenidos de la simulación numérica de un ensayo de carga estática sobre un modelo de elementos finitos del pilote calibrado a partir de un ensayo dinámico del tipo TRM. El procedimiento de calibración se basa en ajustar las propiedades del suelo, en particular su módulo elástico, para que la rigidez inicial de la curva carga-asentamiento obtenida del modelo numérico coincida con la rigidez obtenida del ensayo TRM.

En este trabajo se propone continuar y profundizar en el desarrollo de este procedimiento. Con este fin, en esta sección, se propone en primer lugar comparar la curva carga-

asentamiento de un ensayo estático con la predicción obtenida de un modelo numérico sin ningún ajuste y los obtenidos al calibrar su rigidez inicial. En este ejemplo la rigidez inicial se obtiene de la pendiente inicial de las curvas carga-asentamiento obtenida de ensayos estáticos. Luego se propone utilizar el modelo numérico calibrado para simular un ensayo TRM y comparar el valor de la rigidez dinámica obtenida de la curva de movilidad con el valor de la rigidez estática utilizado en la calibración.

El ensayo estático a analizar corresponde al pilote denominado B1 que fue realizado como parte del Evento Internacional de Predicción de Capacidad de Pilotes en Limelette cuyos resultados fueron publicados por Holeyman *et al* (2003). La Figura 9 muestra la configuración geométrica planteada para el análisis junto a las propiedades de los suelos. Según la información del evento el módulo elástico del hormigón es 40000MPa y la velocidad de propagación de onda es de 4000m/s.

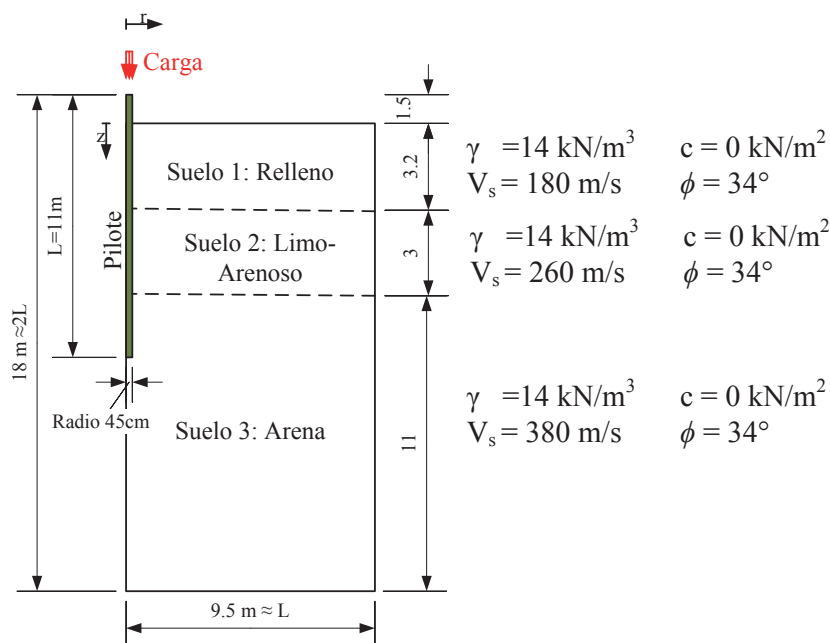


Figura 9. Configuración geométrica y propiedades del suelo para el Pilote B1

4.1 Simulación numérica de ensayos de carga estática

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos a partir de diferentes modelos constitutivos y como parte de este trabajo se han implementado en el programa de elementos finitos los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb (MC) y el hiperbólico de Duncan y Chang (DC). En esta sección se comparan las curvas carga-asentamiento obtenidas utilizando estos modelos para representar el comportamiento del suelo.

La Figura 10 compara el resultado del ensayo de carga estática con los resultados obtenidos utilizando el modelo constitutivo MC. A partir de esta curva se determinó que la rigidez inicial del sistema suelo-pilote es igual a 575000 kN/m. En la figura se presenta una curva correspondiente a la simulación numérica del ensayo con y sin la calibración de su rigidez inicial. Se puede apreciar una importante mejora en la respuesta obtenida al ajustar el modelo.

En este caso el ajuste se realizó adoptando valores del módulo elástico del suelo igual a un 60% de los valores obtenidos a partir de la velocidad de propagación de onda correspondiente publicada por Holeyman et al (2003).

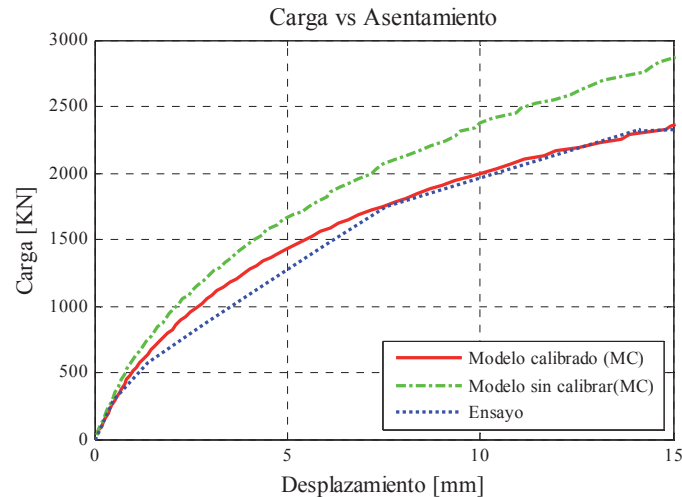


Figura 10. Curva carga vs desplazamiento para el pilote B1 correspondientes al modelo calibrado y sin calibrar

La Figura 11 compara los resultados obtenidos al utilizar los modelos de MC y el de DC. En ambos casos se realizó el ajuste de rigidez inicial descrito. De la comparación de los resultados resulta que en este caso el modelo de MC permite predecir con mayor aproximación el comportamiento del pilote.

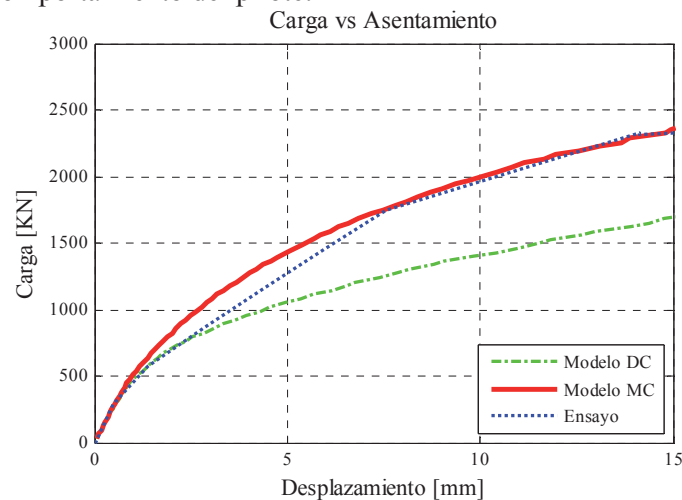


Figura 11. Curvas carga vs desplazamientos utilizando el modelo de Mohr-Coulomb y el de Duncan y Chang

4.2 Simulación numérica de un ensayo TRM

Con el fin de simular un ensayo del tipo TRM se aplicó al modelo una carga tipo impulsiva como la descrita en la Sección 3.2. La Figura 12 muestra la curva de movilidad correspondiente. A partir de esta curva se realizaron dos análisis. En primer lugar, y a partir

de los picos que se aprecian en la figura, se determinó una longitud del pilote de 10.47m que difiere de la real en un 5%. En segundo lugar, ya partir de la pendiente inicial de la curva, se determinó una rigidez dinámica igual a 618000kN/m.

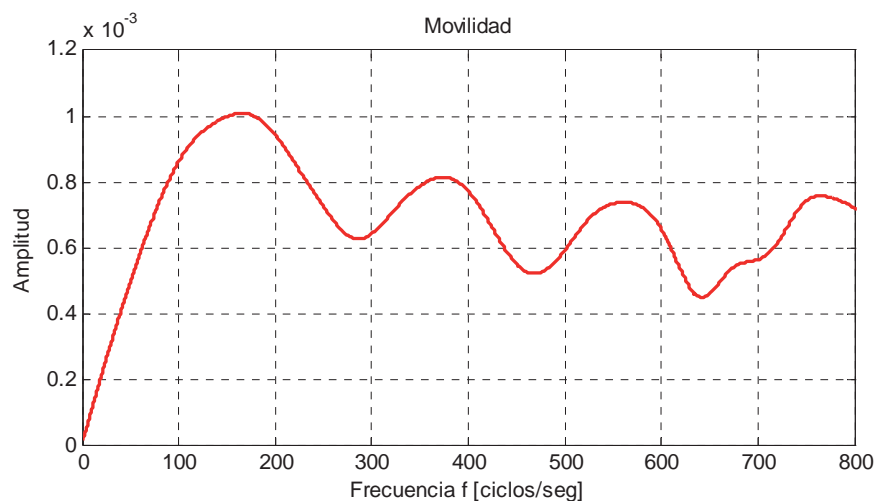


Figura 12. Curva de movilidad del pilote B1

5 CONCLUSIONES

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de pilotes excavados bajo cargas axiales, en el presente trabajo se presentan resultados numéricos obtenidos de un programa de elementos finitos implementado desarrollado específicamente con este fin. Con el programa se puede analizar el comportamiento dinámico y estático de modelos de sistemas suelo-pilotes. El programa permite entonces simular tanto los ensayos dinámicos de bajas deformaciones del tipo TRM como ensayos estáticos. El programa permite considerar el comportamiento no lineal del suelo con los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb y el hiperbólico de Duncan y Chang.

Las simulaciones de ensayos TRM y de carga estática realizadas indican que, en los casos estudiados, la diferencia entre las rigideces estáticas y dinámicas predichas es menor a un 30%.

Por último, se discute y aplica el procedimiento de calibración propuesto por Caballero (2007) que permite ajustar la rigidez inicial del modelo con la obtenida de ensayos dinámicos de bajas deformaciones. En el caso del pilote analizado, las predicciones del modelo calibrado aproximan satisfactoriamente al ensayo estático en el rango de las deformaciones iniciales utilizando ambos modelos constitutivos, pero una vez superadas estas deformaciones, solamente el modelo de MC es capaz de representar el comportamiento del pilote.

6 REFERENCIAS

Caballero, C. R., Evaluación Numérico Experimental del Comportamiento bajo Carga Axial

- de Pilotes. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2007.
- Davis, A. G. y Dunn, C. S., From Theory to Field Experience with the Non-Destructive Vibration Testing of piles, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 57(2), 571-593, 1974.
- Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S. y Mabry, P., Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. Report No. UCB/GT/80-01, University of California, Department of Civil Engineering, Berkeley, California, 1980.
- Duncan, J. M. y Chang, C. Y., Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 96:1629-1653, 1970.
- Hertlein, B. y Davis, A., *Nondestructive Testing of Deep Foundations*, John Waley & Sons, 2006
- Holeyman, A. E. y Charue, N., International Pile Capacity Prediction Event at Limelette. *Belgian Screw Pile Technology: Design and Recent Developments - Proceedings of the Second Symposium on Screw Piles*, Brussels, Belgium, 2003.
- Liao, S. T., y Roesset, J. M., Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21, 255-275, 1997.
- Owen, E., y Hinton, D. R. J., *Finite Elements in Plasticity*, Pineridge Press Limited, U.K. , 1980s
- Wang, G. y Sitar, N., Static and Dynamic Axial Response of Drilled Piers. II: Numerical Simulation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 137(12), 1143:1153, 2011