

APM|AC

Métodos Computacionais em Engenharia

Editores: Carlos A. Mota Soares - António L. Batista - Gabriel Bugeda - Manuel Castelleiro
José Maria Góicoechea - João A. C. Martins - Carlos A. B. Pina - Hélder C. Rodrigues

SEMNI

Métodos Computacionais em Engenharia

Incorporando
VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional
(APMTAC)
VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería
(SEMNI)

Lisboa
2004



Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia

Incorporando

VIII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional
(APMTAC)

VI Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería
(SEMNI)

Lisboa, 2004

Editores:

Carlos A. Mota Soares

António L. Batista

Gabriel Bugeda

Manuel Casteleiro

José Maria Goicolea

João A. C. Martins

Carlos A. B. Pina

Hélder C. Rodrigues

Publicado por:

APMTAC

Associação Portuguesa de Mecânica
Teórica, Aplicada e Computacional

SEMNI

Sociedad Española de Métodos
Numéricos en Ingeniería

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Métodos Computacionais em Engenharia

Editores: Carlos A. Mota Soares, António L. Batista, Gabriel Bugeda, Manuel Casteleiro,
José Maria Goicolea, João A. C. Martins, Carlos A. B. Pina, Helder C. Rodrigues

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Divisão de Edições e Artes Gráficas
Av. Brasil, 101 – 1700-066 Lisboa

Edição 2004

Tiragem: 500 exemplares

Palavras-chave: Engenharia / Método de computação / Congresso / ES / PT
Keywords: Engineering / Computational methods / Congress / ES / PT

CDU 62:519.6(063)(460)+(469)
ISBN 972-49-2008-9

Depósito Legal: 211340/04

Concepção gráfica: Helder David

ÍNDICE

SESSÕES PLENÁRIAS

Tendencias actuales de la simulación en mecanobiología <i>M. Doblaré e J. M. García</i>	3
Topology optimization in wave-propagation problems <i>O. Sigmund e J. S. Jensen</i>	4
Ocean observing systems: learning from seven years of experience in the Columbia river <i>A. Melo Baptista</i>	5
The role of applied and computational mechanics in structural design: some basic issues <i>A. J. Reis</i>	6

AEROELASTICIDADE

Aplicação da teoria de elementos finitos corotacional e múltiplos sistemas de coordenadas móveis a problemas de aeroelasticidade não lineares <i>A. Relvas e A. Suleman</i>	9
Modelo computacional de análise aeroelástica das condições de utilização de estruturas esbeltas <i>A. V. Lopes, A. Cunha e L. M. C. Simões</i>	10
Métodos numéricos de identificação de parâmetros en ensayos aeroelásticos de modelos seccionales de tableros de puentes <i>F. Nieto, A. León, J. Á. Jurado e S. Hernández</i>	11
A interacção do vento com grandes estruturas <i>J. A. G. Saraiva e F. V. Marques da Silva</i>	12
Configuraciones óptimas de cables en puentes atirantados según análisis de sensibilidad de su comportamiento aeroelástico <i>J. Á. Jurado, A. Mosquera, F. Nieto e S. Hernández</i>	13
Desempenho aeroelástico de uma asa adaptativa com casca e longarina activas <i>J. Rocha, A. P. Costa, P. A. Moniz e A. Suleman</i>	14
Interpolacion con splines volumetricos aplicado a la transferencia de datos en problemas eroelásticos <i>M. Cordero-Gracia, P. Ripolles, E. Valero e M. Gomez</i>	15
Aplicación del MAC en el análisis de flameo <i>J. López Díez, I. Población, C. Cuerno, A. Güemes e J. Casado</i>	16

APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Análise do comportamento estrutural de pilares de CAR submetidos a carregamentos centrado e excêntrico usando o software CASTEM-2000 <i>L. M. C. Jacomassi, M. P. Barbosa e A. L. Gamino</i>	19
---	----

Métodos numéricos para un modelo multivoco de flujo de agua en corrientes rápidas de hielo <i>N. Calvo, A. I. Muñoz, J. Durany, E. Schiavi e C. Vázquez</i>	235
Simulación numérica en glaciología mediante modelos globales de hielo poco profundo <i>N. Calvo, J. Durany e C. Vázquez</i>	236
Simulação numérica da fronteira livre num fluido viscoelástico <i>R. Barreira e C. Albuquerque</i>	237
Una contribución a la datación del retroceso de la línea de anclaje del banco de hielo de Ross (Antártida) <i>R. Hindmarsh, F. Navarro e C. Martín</i>	238
Localização de soluções fracas para escoamentos de fluidos não-Newtonianos <i>S. N. Antontsev e H. B. Oliveira</i>	239

GEOTECNIA

Bases para elementos finitos em grades diádicas <i>C. G. S. Cardoso, A. Gomide e J. Stolfi</i>	243
Programas auxiliares de processamento de dados e de resultados de dois programas que permitem a simulação numérica de túneis 2D e 3D <i>F. F. Martins, B. D. S. S. Valente e J. A. de Sousa</i>	244
Modelos discretos y continuos para la modelización de deslizamientos rápidos de ladera <i>M. I. Herreros, E. González, M. Pastor, M. Quecedo e J. A. F. Merodo</i>	245
Respuesta dinámica de pilotes y grupos de pilotes en suelos porosos <i>O. Maseo e J. J. Aznárez</i>	246
Algoritmo para análise transiente tridimensional de meios descontinuos pelo método dos elementos discretos <i>R. B. Mendes, J. L. D. Alves e L. Landau</i>	247
Utilização do método dos elementos discretos na análise de barragens - um modelo constitutivo de interface betão-rocha <i>R. Resende, J. V. Lemos e P. B. Dinis</i>	248

GERAÇÃO DE MALHAS

Geração de malhas estruturadas para problemas de dinâmica dos fluidos computacional <i>C. Ciortan, C. G. Soares, J. Wanderley e C. Levi</i>	251
Transformando triangulaciones en superficies <i>C. Cortés, C. Grima, A. Márquez, F. Hurtado, F. Santos e J. Valenzuela</i>	252
O algoritmo de refinamento de Bank em 2 dimensões: uma abordagem utilizando MATLAB <i>E. Costa e Silva, N. Domingues e J. Figueiredo</i>	253
Geração de malhas estruturadas em superfície <i>J. Baltazar e L. Eça</i>	254
Optimization of surface meshes by projection on the plane <i>J. M. Escobar, R. Montenegro, G. Montero, E. Rodríguez e J. M. González-Yuste</i>	255

RESPUESTA DINÁMICA DE PILOTES Y GRUPOS DE PILOTES EN SUELOS POROSOS

O. Maeso y J.J. Aznárez

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico del Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas de Gran Canaria, Spain
e-mail: omaeso@iusiani.ulpgc.es ; jaznarez@iusiani.ulpgc.es

RESUMEN

El estudio de la respuesta de pilotes y grupos de pilotes ante sollicitación dinámica es un problema clásico dentro del campo de la interacción suelo-estructura que ha recibido considerable atención en las últimas décadas. Existen numerosos estudios basados en modelos simplificados para los pilotes y/o el suelo. En la mayor parte de los casos el suelo se ha modelado como un semiespacio elástico o viscoelástico, pero son pocos los estudios de pilotes embebidos en suelos saturados de agua, y a menudo la naturaleza saturada del suelo se ha contemplado asumiendo para éste un comportamiento elástico con un coeficiente de Poisson cercano a 0.5. Existen muy pocas aportaciones en las que el carácter bifásico de estos suelos haya sido tenido en cuenta de acuerdo a la teoría de Biot, y la mayoría contiene simplificaciones acerca de la geometría de los pilotes o las propiedades del suelo que limitan su aplicabilidad.

En esta comunicación se presenta una técnica numérica basada en el Método de los Elementos de Contorno para el análisis dinámico en dominio de la frecuencia de pilotes aislados y grupos de pilotes hincados en terrenos porosos saturados de agua. La estrategia tiene en cuenta de forma rigurosa la naturaleza y geometría de los medios implicados en el análisis así como las condiciones de interacción entre ellos: el pilote es considerado como un medio viscoelástico con su geometría real y el terreno como un semiespacio de naturaleza poroelástica de acuerdo a la teoría de Biot. La interacción entre ambos se establece de forma rigurosa a través de ecuaciones de compatibilidad y equilibrio. Se han empleado elementos de contorno cuadriláteros de nueve nodos y triangulares de seis para discretizar los pilotes y la superficie del suelo.

Se presentan resultados de las componentes horizontal y vertical de la matriz dinámica de rigidez para un pilote aislado y para grupos de 2×2 pilotes. Se analiza la influencia de factores como la frecuencia de excitación, la esbeltez del pilote, la rigidez relativa pilote-suelo, los fenómenos de interacción mutua pilote-suelo-pilote, las condiciones de contacto y la permeabilidad del terreno.

A diferencia de otras técnicas existentes aplicables al mismo problema, el modelo que se presenta es más versátil y permite cualquier geometría del pilote y terreno, así como la presencia de estratos de naturaleza elástica y/o poroelástica de forma conjunta. A pesar de su generalidad, el programa desarrollado al efecto resulta sencillo en su manejo.

RESPUESTA DINÁMICA DE PILOTES Y GRUPOS DE PILOTES EN SUELOS POROSOS

O. Maeso y J.J. Aznárez

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Tecnológico del Campus Universitario de Tafira, 35017
Las Palmas de Gran Canaria, España
e-mail: omaeso@iusiani.ulpgc.es jaznarez@iusiani.ulpgc.es

Palabras clave: Pilotes, Interacción suelo-estructura, Rigidez dinámica, Suelos poroelásticos, Elementos de Contorno.

Resumen. *Se presenta un modelo tridimensional de Elementos de Contorno para la determinación de la rigidez dinámica de pilotes y grupos de pilotes hincados en terrenos saturados. El pilote es considerado un medio elástico y el suelo un medio de naturaleza poroelástica de acuerdo a la teoría de Biot. Pilotes y semiespacio son discretizados y la interacción entre ambos es tomada en cuenta de forma rigurosa a través de las correspondientes ecuaciones de equilibrio y compatibilidad. Se presentan resultados de impedancia vertical y horizontal para pilotes simples y grupos de 2 x 2 pilotes. Con ellos se estudiará la influencia de aspectos tales como la frecuencia de excitación, rigidez del pilote, geometría de la cimentación, permeabilidad del terreno, etc. El modelo presentado tiene pocas limitaciones y es capaz de representar casos más generales en cuanto a propiedades y geometría que los existentes hasta el momento.*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas muchos han sido los modelos desarrollados que permiten obtener la rigidez dinámica de pilotes o grupos de pilotes hincados en el semiespacio o estratos de naturaleza elástica (Novak [1]). Menos atención ha recibido el estudio de la respuesta dinámica de pilotes embebidos en terrenos saturados de agua y en muchos de los modelos desarrollados se considera el suelo como un medio elástico incompresible (coeficiente de Poisson cercano a 0.5). Muchos menos son aquellos que asimilan el terreno a un medio de naturaleza bifásica de acuerdo a la teoría de Biot [2,3]. En este sentido son de destacar las aportaciones de Zeng y Rajapakse [4] que obtiene la rigidez dinámica vertical para un pilote simple, Jing et al. [5] también para un pilote simple la impedancia horizontal y Wang et al. [6] que extienden los planteamientos anteriores al estudio de grupos de pilotes embebidos en el semiespacio poroelástico. En estos estudios, el pilote se modela como una barra y la interacción pilote-suelo y pilote-suelo-pilote se considera de forma simplificada.

En este artículo se presenta un modelo acoplado de elementos de contorno en el dominio de la frecuencia que permite determinar la impedancia dinámica de pilotes simples y grupos de pilotes hincados en un semiespacio poroelástico [7]. Ambas regiones, pilote y suelo, son tenidas en cuenta en su exacta geometría. El pilote es considerado un medio elástico y el semiespacio un medio poroelástico para el que se emplea la formulación integral desarrollada por Domínguez [8]. La interacción pilote-terreno es tenida en cuenta de forma rigurosa a través de las correspondientes ecuaciones de compatibilidad y equilibrio. Asimismo, esta interfase puede ser permeable o impermeable.

Los resultados que se presentan se refieren a pilotes de sección circular embebidos en el semiespacio si bien el modelo desarrollado permite el análisis de configuraciones más complejas incluyendo la presencia de estratos de naturaleza elástica o poroelástica. Se presentan resultados para los problemas vertical y horizontal. Se estudiará la influencia de la frecuencia, la rigidez relativa pilote-suelo, la separación entre pilotes y la permeabilidad del terreno.

2. MODELO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

Como ya hemos adelantado en la introducción, la variable utilizada en este artículo para representar el comportamiento dinámico del pilote simple o grupo de pilotes será la rigidez o impedancia. Para una frecuencia cualquiera, esta variable relaciona el vector de fuerzas (y momentos) aplicado al encepado (considerado infinitamente rígido) y el vector de desplazamientos (y giros) resultante.

Cada término K_{ij} de la matriz de rigidez representa la fuerza o momento resultante en la coordenada i ante un desplazamiento o giro unitario armónico en la dirección j . En problemas armónicos se trata de una variable compleja que depende de la frecuencia ω y que se escribe de forma usual como sigue:

$$K_{ij} = k_{ij} + i a_o c_{ij} \quad (1)$$

donde k_{ij} y c_{ij} representan los coeficientes de rigidez y amortiguamiento respectivamente y a_o la frecuencia adimensional:

$$a_o = \frac{\omega d}{c_s} \quad (2)$$

en la que d es el diámetro del pilote y c_s la velocidad de propagación de las ondas de corte en el medio poroelástico. La Figura 1 ilustra el problema a resolver para un encepado de cuatro pilotes (2×2).

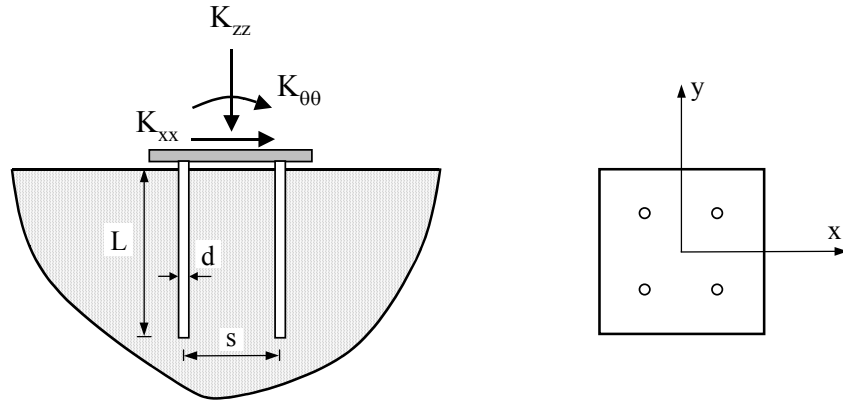


Figura 1. Grupo de 2×2 pilotes. Descripción del problema.

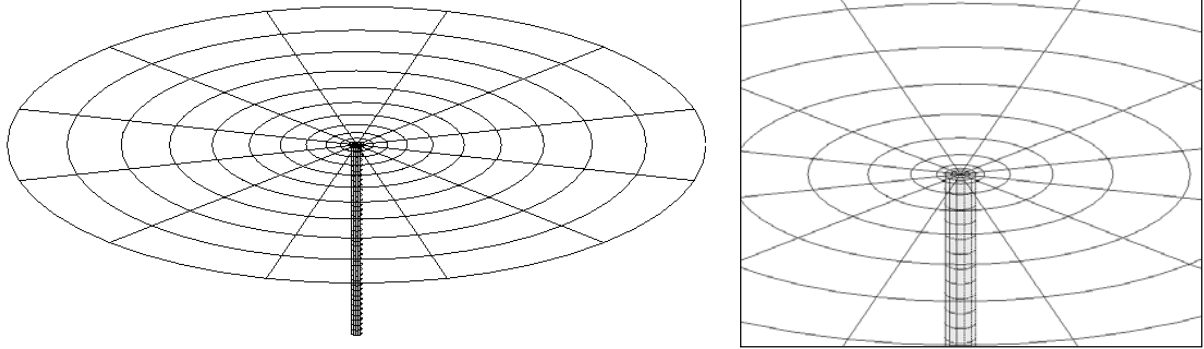
En este artículo se presentan resultados de impedancia horizontal (K_{xx}) y vertical (K_{zz}) para pilotes simples y grupos de 2×2 pilotes de sección circular bajo encepado rígido. El modelo desarrollado permite la consideración de configuraciones más complejas. Nos referimos a grupos de pilotes con diferente longitud, sección variable o hincados en el terreno con cierta inclinación. Este tipo de configuraciones no representan dificultad conceptual añadida y sólo requieren de la adecuada discretización en elementos de contorno.

La Figura 2 presenta las discretizaciones de elementos de contorno utilizadas para determinar la rigidez de un pilote simple y un grupo de cuatro pilotes embebidos en el semiespacio poroelástico. Se presenta la geometría completa si bien el programa desarrollado permite incorporar la simetría del problema con lo cual sólo será necesario discretizar un cuadrante del total de dicha geometría.

El tipo de solución fundamental empleada para el semiespacio obliga a discretizar la superficie libre de éste. En este contorno se imponen condiciones de tracción y presión de poro nulas. Hasta donde los autores conocen, no existe una formulación cerrada de una solución fundamental para el semiespacio que permita tener en cuenta la superficie libre. La cantidad de superficie libre a considerar y otros criterios de la discretización (tamaño de elementos, relación de aspecto según el contorno, etc.) han sido estudiados por los autores para este problema en trabajos previos (Vinciprova et al. [9]). Otras cuestiones relacionadas

con la metodología empleada y la validación del modelo con resultados publicados por otros autores para semiespacio elástico o poroelástico puede consultarse en [7] y [10].

Pilote simple



Encepado con 2x2 pilotes

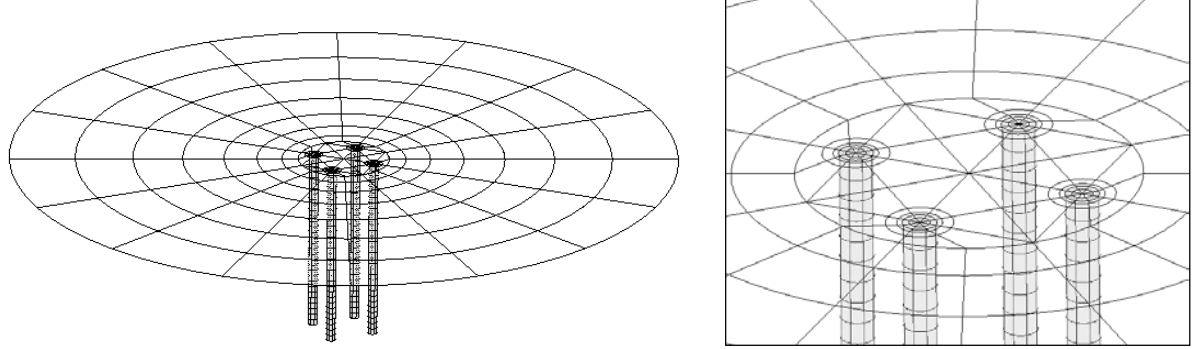


Figura 2. Discretización de elementos de contorno.

3. ANÁLISIS NUMÉRICO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En lo que sigue se van a presentar resultados de impedancias dinámicas de pilotes y grupos de 2×2 pilotes de sección circular embebidos en un semiespacio poroelástico saturado cuyas propiedades se han tomado de Kassir y Xu [11]. A continuación se detallan en términos de parámetros adimensionales cuya definición está recogida en el Anexo. Los valores normalizados de las propiedades de este medio son: constante de Lamé $\lambda^* = 1$, constantes de Biot $Q^* = 14.33$ y $R^* = 7.72$, densidad de las dos fases, sólido $\rho_s^* = 1.12$, y fluido $\rho_f^* = 0.78$, densidad añadida $\rho_a^* = 0$ y constante de disipación $b^* = 59.30$, habiendo definido $b = \gamma_f \phi / k$ donde k (m/s) es la permeabilidad del medio poroso (dependiente de la viscosidad del fluido y de la permeabilidad intrínseca del esqueleto) y γ_f el peso específico de la fase fluida. La

porosidad es $\phi = 0.35$ y el coeficiente de amortiguamiento interno del esqueleto es $\beta = 0.05$. Para los pilotes (notados con el sub-índice p) se asume un comportamiento viscoelástico con propiedades similares al hormigón: relación de rigidez $E_p/E = 343$ (E = módulo de Young del medio poroso drenado), relación de densidades $\rho_p/\rho = 1.94$ (ρ = densidad del medio poroso), coeficiente de Poisson $\nu_p = 0.2$ y un coeficiente de amortiguamiento interno nulo. La relación de esbeltez de los pilotes es $L/d = 15$. Salvo cuando se explicita otra cosa, la condición de contacto entre pilotes y suelo se ha considerado soldada e impermeable. Se evaluará la influencia que sobre las impedancias dinámicas tienen aspectos como la frecuencia excitadora, la rigidez de los pilotes, así como los efectos poroelásticos relativos a la permeabilidad del medio y a la condición de contacto pilote-suelo.

3.1. Influencia de la flexibilidad del pilote

La influencia de la relación de rigidez E_p/E sobre k_{xx} y c_{xx} se presenta en función de la frecuencia adimensional a_o en las Figuras 3a y b. Los valores de rigidez y amortiguamiento se presentan normalizados con el producto (μd) (μ = módulo de elasticidad transversal). En el análisis se han utilizado cuatro valores de la relación de rigidez $E_p/E = 100, 200, 500, 1000$ y dos suelos poroelásticos distintos con valores de $b^* = 0$ (permeabilidad $k \rightarrow \infty$) y 5.93 (10 veces más permeable que en [11]). Algunos aspectos del problema a tener en cuenta a la luz de la Figuras 3a y b: en todo el rango de frecuencia se obtienen valores crecientes rigidez y amortiguamiento a medida que aumenta E_p/E . Para $b^* = 5.93$ los resultados de la rigidez dinámica (k_{xx}) muestran una escasa dependencia respecto de la frecuencia de excitación a_o en todos los casos. Sólo a muy bajas frecuencias se observa un incremento súbito de la rigidez desde el valor estático para medios con b^* elevada. En estos problemas la rigidez estática es independiente de b^* y coincide con la obtenida para el suelo completamente drenado. Este efecto será observable en todos los resultados que se presentarán en adelante.

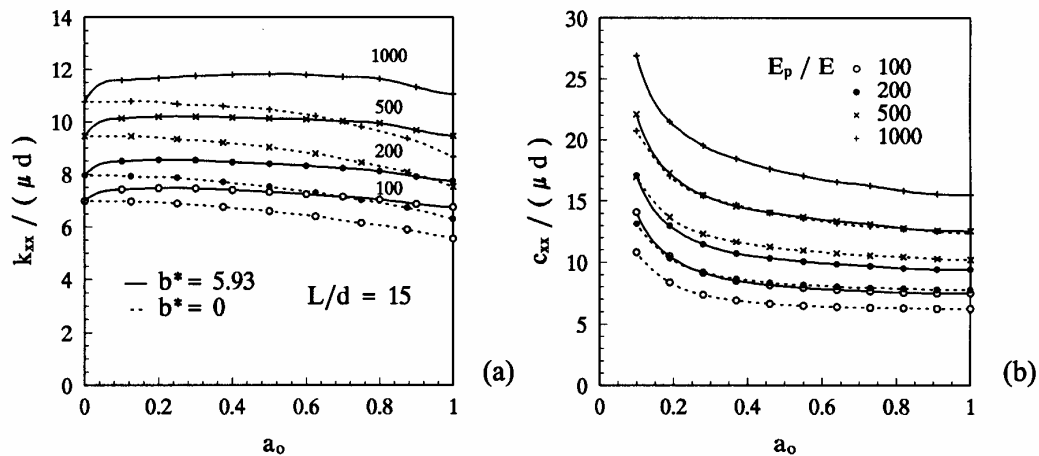


Figura 3. Influencia de la flexibilidad del pilote sobre la impedancia horizontal. Pilote simple.

Para el valor límite $b^* = 0$ se aprecia una disminución importante de la impedancia con respecto a suelos con b^* alta. Se aprecia una disminución progresiva y significativa de la rigidez del modelo según aumenta la permeabilidad del terreno y la frecuencia de excitación. Este efecto es más importante conforme aumenta E_p/E . En el próximo apartado, donde se estudia la influencia de la permeabilidad del terreno, incidiremos otra vez sobre este efecto.

Con los cuatro valores anteriores de E_p/E se han obtenido resultados adicionales de impedancia dinámica para $L/d = 5, 10$ y 20 (no presentados). En el rango estudiado y para todos los valores de E_p/E los pilotes con $L/d = 10, 15$ y 20 presentan casi idéntica respuesta dinámica horizontal. Sólo se aprecia un comportamiento diferente para $L/d = 5$ y valores de $E_p/E = 100, 200$ y 500 . Esta insensibilidad de la respuesta horizontal por encima de cierto valor de la esbeltez del pilote (L_a/d , L_a = longitud activa del pilote) es un efecto conocido y estudiado en la bibliografía. La longitud activa depende de la rigidez relativa pilote-suelo E_p/E y físicamente representa que para pilotes con $L \geq L_a$ la deformación impuesta en la cabeza del pilote no se deja sentir en toda su longitud sino sólo a profundidad menor que L_a .

3.2. Influencia de la permeabilidad del suelo

Ya se ha visto que la constante de disipación b (inversamente proporcional a la permeabilidad k) afecta de manera significativa a la respuesta dinámica: valores altos de b (arcillas) implican una mayor dificultad en el tránsito de fluido a través del esqueleto sólido en relación a valores bajos de b (arenas sueltas). Para entender la influencia de b , previamente se presenta un breve análisis de su influencia sobre las velocidades de propagación de las ondas presentes en el suelo poroso. La Figura 4 muestra, para tres valores de la frecuencia adimensional ($a_o = 0.25, 0.5$ y 0.75) la variación de la amplitud de la velocidad de propagación de la onda S (onda de corte) y de la onda P2 (onda longitudinal de segundo tipo) en un amplio rango de la constante adimensional b^* . El modulo de las velocidades se ha normalizado con la velocidad de la onda S en el medio elástico ideal no-drenado c_s . En el mismo rango de b^* la velocidad de la onda longitudinal de primer tipo P1 ($|c_{P1}/c_s| \approx 8$) sólo experimenta una pequeña disminución (del orden del 1%) por lo cual se ha omitido su representación. Se observa que la onda S presenta una variación en su velocidad del orden del 20%, pero es la velocidad de la onda más corta (P2) la que presenta variación más importante con b^* . Puede observarse en la figura que esta velocidad crece muy rápidamente para valores de b^* entre 10^1 y 10^{-2} , y que se hace más rápida que la onda S para valores de b^* por debajo (aproximadamente) de 10^{-1} . Poca influencia debe esperarse para valores de b^* superiores a 59.3 , que es su valor en el suelo considerado. Nuestro estudio se centra en analizar la influencia de b^* en el rango de sus valores límites. Tres valores para b^* se han adoptado: $b^* = 59.3, 59.3 \times 10^{-2}$ y 59.3×10^{-4} . Las Figuras 5 y 6 muestran, respectivamente, las impedancias horizontal y vertical de un pilote simple para los tres valores de b^* . Los valores se presentan normalizados con el valor de la rigidez estática. De nuevo se observa una disminución de las partes real (rigidez) e imaginaria (amortiguamiento) a medida que b^* disminuye, esto es, para suelos progresivamente más permeables. Las figuras muestran también las impedancias correspondientes a los dos medios monofásicos ideales límites: suelo elástico drenado y suelo

elástico no drenado. Valores altos de b acercan el comportamiento del medio bifásico al del suelo elástico ideal no drenado, salvo, como es lógico, a bajas frecuencias. Para el caso de impedancia vertical, el medio elástico drenado marca asimismo la frontera hacia la que tiende el medio bifásico a medida que aumenta su permeabilidad. Sin embargo, la parte real de la rigidez horizontal (Figura 5a) cae por debajo del valor correspondiente al medio elástico drenado cuando la permeabilidad del suelo es muy alta, y este efecto es creciente con a_o . Este hecho puede ser explicado. Para el caso de impedancia vertical, y para un suelo muy permeable, la transferencia dinámica de carga entre pilote y suelo se realiza básicamente en el contorno lateral del pilote a base de tracciones rasantes en el esqueleto sólido: en estas condiciones el fluido de poro apenas aporta rigidez y el comportamiento del medio es parecido al de un suelo drenado. Sin embargo, en el caso de impedancia horizontal, la flexión lateral del pilote solicita de las dos fases en el suelo, provocando zonas de presiones y succiones de la presión de poro. Esto modifica el comportamiento frente al del suelo drenado.

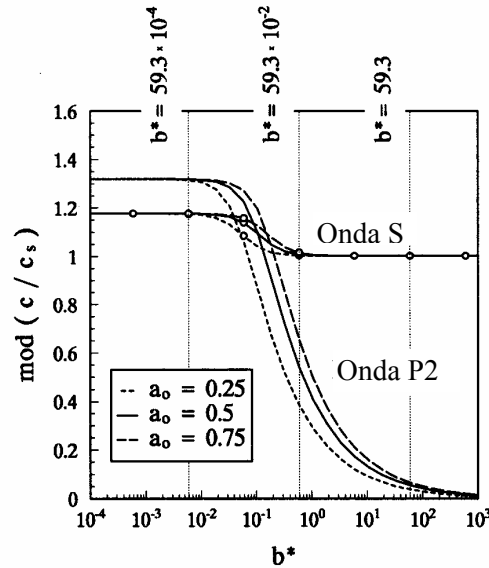


Figura 4. Amplitud de las velocidades de propagación de las ondas en el suelo vs. constante de disipación.

Las figuras 7 y 8 muestran, respectivamente, las impedancias horizontal y vertical de un grupo de 2×2 pilotes con separación $s/d = 5$. Para la separación $s/d = 10$ los resultados se presentan en las figuras 9 y 10. Los valores de impedancia dinámica se presentan normalizados con respecto al valor de rigidez estática de cada pilote aislado y el número de pilotes bajo el encepado. Se observa que para un grupo de pilotes la respuesta dinámica es algo más compleja y que la rigidez del grupo no puede obtenerse como superposición de las rigideces de cada pilote actuando aisladamente: se mantiene la tendencia general de valores crecientes de la impedancia con b^* , pero a este efecto se añaden ahora fenómenos de reflexión de ondas que tienen lugar entre pilotes en función de la separación entre éstos y de las propiedades del medio. Esto ocasiona incrementos o decrementos de la rigidez en determinados rangos de frecuencia, por lo que pueden llegar a encontrarse impedancias

superiores en medios con menor b^* . Así, se aprecia en las Figuras 7a, 8a y 10a máximos de rigidez superiores para $b^* = 59.3 \times 10^{-4}$ que para $b^* = 59.3 \times 10^{-2}$. Este efecto se combina con el desplazamiento de las curvas hacia la derecha para permeabilidades crecientes. Ello está potenciado por el aumento de las velocidades de propagación en el medio poroso con la permeabilidad, y con el hecho de que en todos los casos la velocidad utilizada para normalizar la frecuencia a_o en (2) es la de la onda S en el medio no drenado (que es su límite inferior). Por último, al igual que ocurre para un pilote simple, la parte real de la rigidez horizontal de un medio poroelástico muy permeable puede ser inferior a la de un suelo elástico drenado, tal como se aprecia en la Figura 9a.

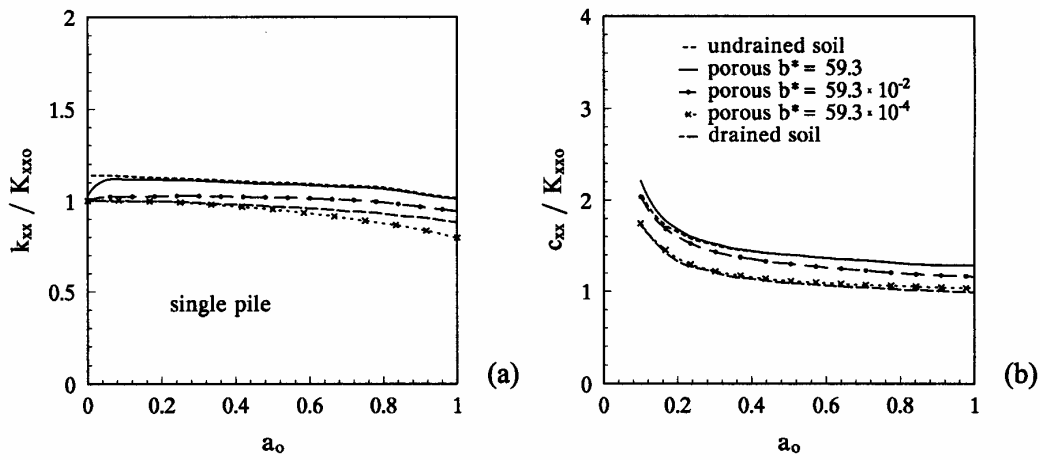


Figura 5. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia horizontal. Pilote simple.

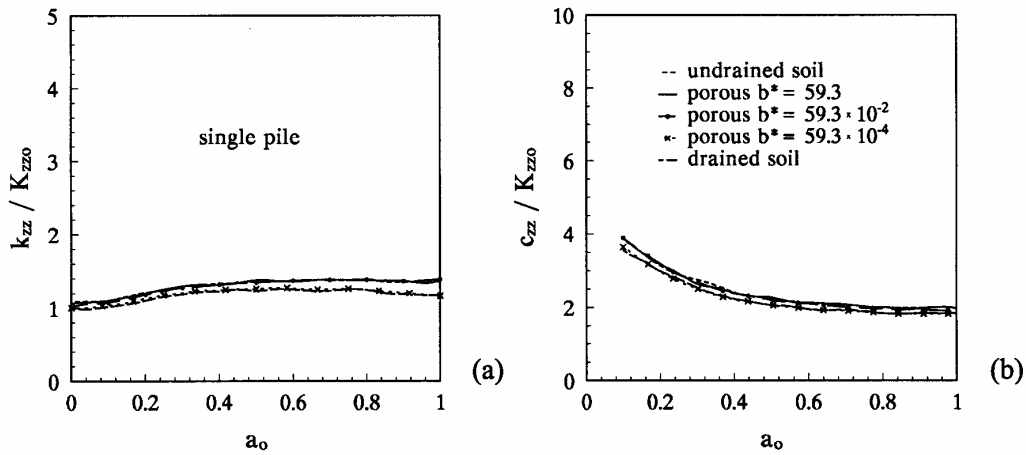


Figura 6. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia vertical. Pilote simple.

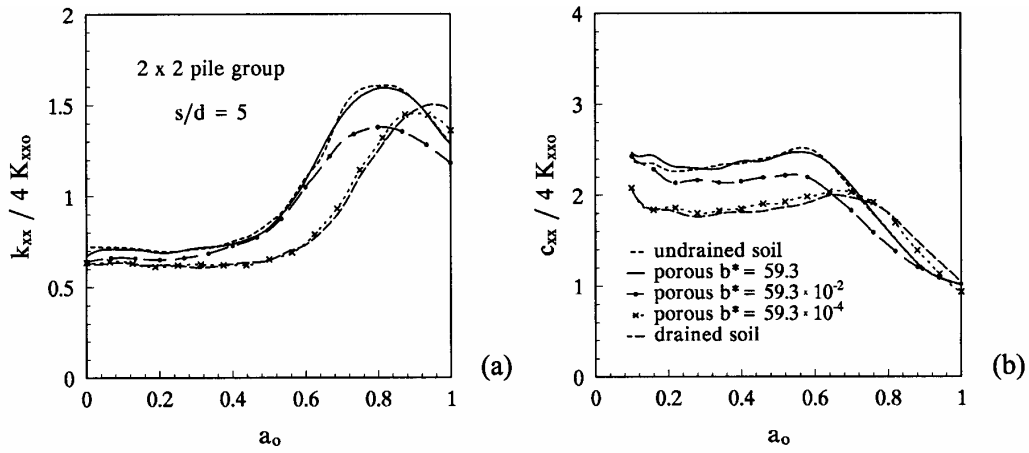


Figura 7. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia horizontal. Grupo de 2x2 pilotes. $s/d = 5$.

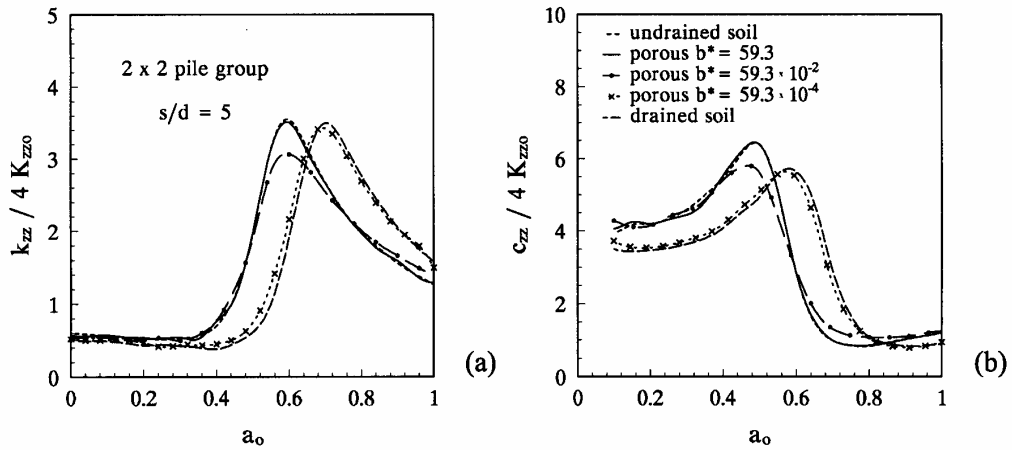


Figura 8. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia vertical. Grupo de 2x2 pilotes. $s/d = 5$.

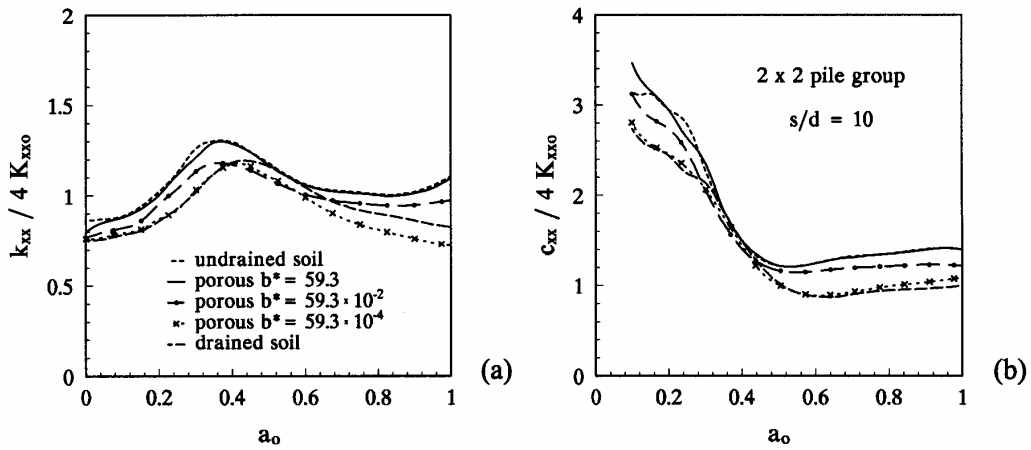


Figura 9. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia horizontal. Grupo de 2x2 pilotes. $s/d = 10$.

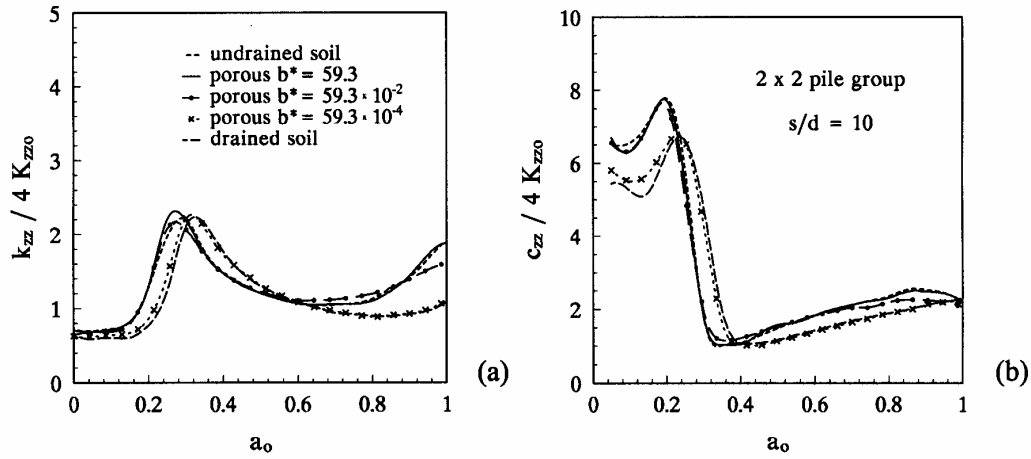


Figura 10. Influencia de la permeabilidad del suelo. Impedancia vertical. Grupo de 2×2 pilotes. $s/d = 10$.

3.3. Influencia de la condición de contacto en la superficie pilote-suelo

Para estudiar este efecto se analiza la diferencia que experimenta la impedancia de un grupo de 2×2 pilotes con separación $s/d = 10$, en dos casos límite: contacto completamente impermeable (mismo desplazamiento normal en ambas fases del medio) y contacto completamente drenado (presión de poro nula). De acuerdo con las conclusiones del subapartado anterior, cabe esperar que la influencia de la condición hidráulica de contacto sea más importante cuanto menor sea b^* , y así lo confirman los resultados. La Figura 11 muestra las impedancias horizontales obtenidas para el medio en estudio ($b^* = 59.3$) para ambas condiciones de interfase. Las diferencias entre ellas son despreciables.

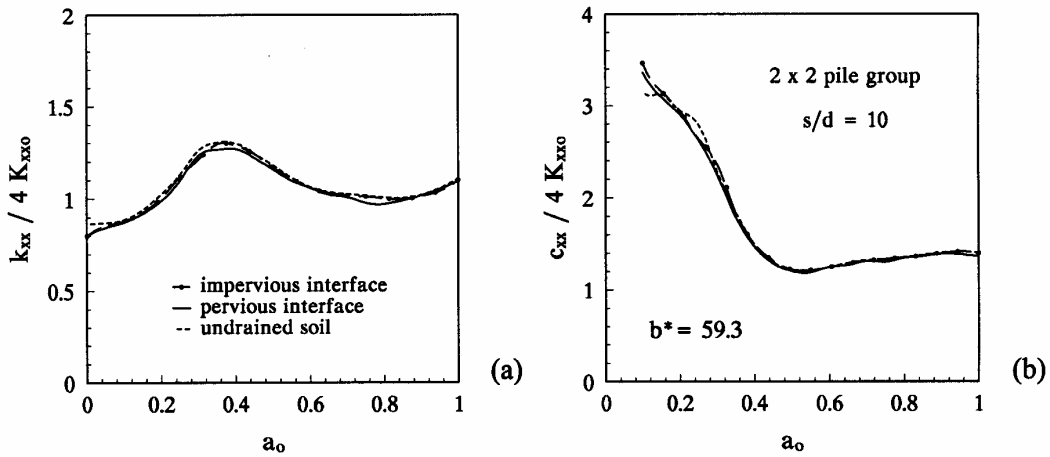


Figura 11. Influencia del tipo de contacto pilote-suelo. Grupo de 2×2 pilotes; $s/d = 10$; $b^* = 59.3$.

La influencia si se aprecia cuando el suelo es muy permeable ($b^* = 59.3 \times 10^{-4}$) tal y como se muestra en la Figura 12. La parte real de la impedancia muestra diferencias crecientes con

a_o a partir de $a_o = 0.4$. Se aprecia también que la rigidez correspondiente al contacto permeable se acerca hacia los valores de un suelo elástico ideal drenado. La explicación propuesta anteriormente para el efecto de ‘des-rigidización’ en el suelo saturado permeable con respecto al suelo elástico drenado, por causa de la presencia de la fase fluida, queda reforzada a la luz de estos resultados. El amortiguamiento de la cimentación se muestra insensible al tipo de condición de contacto.

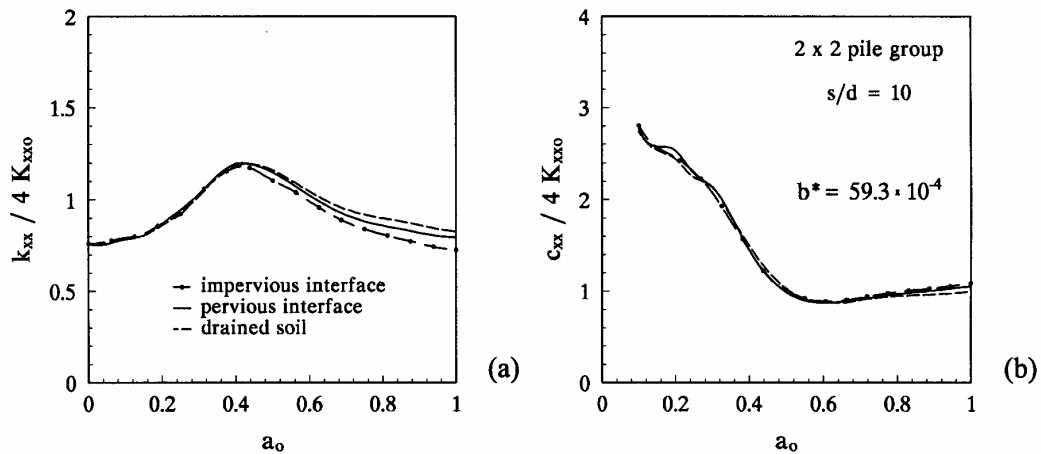


Figura 22. Influencia del tipo de contacto pilote-suelo. Grupo de 2×2 pilotes; $s/d = 10$; $b^* = 59.3 \times 10^{-4}$.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un modelo 3-D de Elementos de Contorno para el cálculo de los coeficientes de rigidez de pilotes y grupos de pilotes hincados en terrenos saturados de agua. El pilote es modelado como un medio viscoelástico y el terreno como un semiespacio de naturaleza poroelástica. El análisis de geometrías más complicadas del terreno, incluyendo regiones poroelásticas y viscoelásticas, puede realizarse con el modelo propuesto sin dificultad añadida. La técnica es aplicada a la obtención de la impedancia dinámica vertical y horizontal de pilotes simples y grupos de 2×2 pilotes bajo un encepado rígido. Se asume que la condición de contacto pilote-suelo es soldada y la interacción se modela de forma rigurosa a través de la imposición en la interfase de las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad. Se han presentado resultados de impedancias y estudiado la influencia de aspectos como: frecuencia de excitación, rigidez del pilote, efectos de interacción pilote-suelo-pilote, permeabilidad del suelo saturado y condición hidráulica de contacto pilote-suelo. Del estudio realizado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

En el suelo poroso saturado la cimentación presenta un incremento de la rigidez desde muy bajas frecuencias con respecto al suelo elástico drenado. Este efecto se aprecia menos a medida que disminuye la constante b en el suelo.

En el rango estudiado de la frecuencia de excitación, el aumento de la rigidez relativa pilote-suelo implica un aumento de la impedancia dinámica, independientemente de la permeabilidad del suelo.

La influencia sobre el comportamiento dinámico de la constante de disipación b (dependiente de la viscosidad del medio y de la permeabilidad intrínseca del esqueleto) es grande pues afecta sensiblemente a las velocidades de las ondas presentes. En general se aprecian impedancias dinámicas crecientes con b , tendiendo a los valores correspondientes a un suelo elástico ideal no drenado.

Suelos porosos muy permeables pueden presentar rigideces horizontales inferiores a las del suelo ideal elástico drenado. Este efecto no se aprecia en el caso de rigidez vertical.

La impedancia dinámica de un grupo de pilotes es más dependiente de la frecuencia que la de un pilote simple debido a los efectos de interacción dinámica pilote-suelo-pilote. Este efecto depende de la separación entre pilotes y de las propiedades del suelo.

El grado de permeabilidad de la condición de contacto pilote-suelo sólo tiene influencia apreciable para valores muy bajos de b , y para el caso de rigidez horizontal.

Se concluye que simular el comportamiento dinámico a través de un modelo monofásico drenado o no drenado puede llevar, dependiendo de las propiedades del medio y de la configuración geométrica de la cimentación, a resultados poco realistas. Cualquier modelo que pretenda usarse para el análisis dinámico de pilotes y grupos de pilotes en suelos poroelásticos debe incorporar todos los parámetros del material. La técnica propuesta en este artículo lo hace, y permite una representación más general y versátil que otras técnicas existentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través del Proyecto de Investigación DPI2001-2377-C02-02, con fondos del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y fondos FEDER. Los autores quieren agradecer la subvención concedida.

REFERENCIAS

- [1] M. Novak, Piles under dynamic loads. 2nd int. conf. recent adv. geotech. earthquake eng. & soil dyn., St. Louis, Missouri, **3**, 250-273 (1991).
- [2] M.A.Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I: Low frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**(2), 168-178 (1956).
- [3] M.A.Biot. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *J. Appl. Phys.*, **33**, 1482-1498 (1962).
- [4] X. Zeng y R.K.N.D. Rajapakse, Dynamic axial load transfer from elastic bar to poroelastic medium. *J. Engrg. Mech. ASCE*, **125**(9), 1048-1055 (1999).
- [5] B. Jin, D. Zhou y Z. Zhong. Lateral dynamic compliance of pile embedded in poroelastic half space. *Soil Dyn. Earthquake Engrg.*, **21**, 519-525 (2001).
- [6] J.H. Wang, X.L. Zhou y J.F. Lu, Dynamic response of pile groups embedded in a poroelastic medium. *Soil Dyn. Earthquake Engrg.*, **23**, 235-242 (2003).
- [7] O. Maeso, J.J. Aznárez y F. García, Dynamic impedances of piles and groups of piles on saturated soils, *Computer&Structures*, (en prensa).
- [8] J. Domínguez, Boundary element approach for dynamic poroelastic problems. *Int.J.Numer. Methods in Engrg.*, **35**(2), 307-324 (1992).

- [9] F. Vinciprova, O. Maeso, J.J. Aznárez y G. Oliveto, Interaction of BEM analysis and experimental testing on pile-soil systems, *Problems in structural identification and diagnostics: General aspects and applications*, C. Davini y E. Viola (Eds)., Springer-Verlag, Wien-New York (2003).
- [10] O. Maeso, J.J. Aznárez y J. Domínguez, Dynamic stiffness of piles in uniform soils, *Advances in Boundary Element Techniques IV*, R. Gallego y M.H. Aliabadi (Eds), 465-470. Department of Engineering, Queen Mary, University of London (2003).
- [11] M. Kassir y J. Xu, Interaction functions of a rigid strip bounded to saturated elastic half-space. *Int. J. Solids and Struct*, **24**(9), 915-936 (1988).

APÉNDICE

Las propiedades del medio proelástico se han normalizado como en [4] del siguiente modo:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\mu} \quad \rho_s^* = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \rho_f^* = \frac{\rho_f}{\rho} \quad \rho_a^* = \frac{\rho_a}{\rho} \quad (\text{A-1})$$

$$Q^* = \frac{Q}{\mu} \quad R^* = \frac{R}{\mu} \quad b^* = \frac{b d}{\sqrt{\mu \rho}} \quad (\text{A-2})$$

donde $\rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi \rho_f$ es la densidad del medio poroso, μ el módulo de elasticidad transversal del esqueleto sólido drenado y d el diámetro del pilote.