



1^{er}

**CONGRESO
NACIONAL
DE
INGENIERIA
SISMICA**



murcia

12-16 de Abril de 1999

**MEMORIAS
Tomo Ib**

Dep. Legal: 84-13.377-99

Edita: D. José Gregorio Sánchez Cabañero,
Vicesecretario de la Asociación Española de Ingeniería Sísmica (aeis).
Almagro, 42 • 28010 Madrid • Tel./Fax: +34 91 523 2685
E-mail: aeis@telcom.es

Visita Técnica (11:30 - 21:00)

Excursión técnica, de carácter opcional, a las proximidades de Lorca para visitar unas trincheras donde observar actividad neotectónica con evidencias de paleosismos. Los participantes en la visita, también asistirán a una recepción ofrecida por el Exmo. Ayuntamiento de Lorca, un almuerzo y una visita turística por la ciudad. Si el desarrollo del programa previsto lo permite, se realizará una visita rápida por la zona de Mula, epicentro del terremoto del 02.02.99.

Miércoles, día 14/04/99

SEDE - A

Conferencia invitada 3 (09:30 - 10:30)

"Medida y predicción de las acciones sísmicas"
Sr. D. Xavier Goula i Suriñach

Pausa de Café (10:30 –11:00)

Sesión Técnica A5 (11:00 - 12:30): "Dinámica de suelos"
Coordinador: Sr. D. Manuel Pastor Pérez

Ponencias:

- Evaluación de la respuesta sísmica del suelo por el método "Reference Spectral Ratio" y su aplicación a las playas de Sudáfrica
Fernández Julián, Luis M. y Brandt, M.B.C.
- Evaluación analítica del potencial de Ilcuetación
Martínez Cutillas, Francisco; Martí, Joaquín y Simic, Davor
- Una técnica numérica para la determinación de rigideces dinámicas de cimentaciones sobre suelos saturados
Aznárez, Juan José; Maeso, O. Y Chirino, F.
- El método de los Elementos de Contorno aplicado a la cuantificación del efecto local
Álvarez Rubio, Sonia y Alarcón, E.

Sesión Técnica A6 (12:30 - 14:00): "Dinámica de estructuras"
Coordinador: Sr. D. José M^º Goicolea Ruigómez

Ponencias:

- Comportamiento de gasoductos en áreas de riesgo sísmico
Fernández, Loeches, R.; Lana, J.A.; Museros, P.; **Retana, M^º Paloma** y Alarcón, E.

- Análisis de la seguridad sísmica de la presa de Zorita
Romera, Luis E. y Hernández, Santiago

- Utilización de dispositivos de disipación en puentes de gran longitud
Astiz, Miguel A.; Muñoz-Rojas, J. y Fernández Troyano, L.

- Simulación paramétrica de acelerogramas en estudios de vulnerabilidad sísmica
Sánchez-Carratalá, Carlos R. y Martín, Manuel G.

Pausa de Comida (14:00 –16:00)

Sesión Técnica A7 (16:00 - 17:30): "Diseño y construcción"
Coordinador Sr. D. Pedro Antona Zamora

Ponencias:

- Valores de ductilidad y desplazamientos desarrollados en un edificio de H. A. (ELS y ELU). Análisis temporal de la migración de rotulas
Catalán Goñi, Aírel y Bozzo Rotonondo, L.
- Uniones viga-columna dúctiles para resistencia sísmica. El terremoto de Northridge
Gil Martín, Luisa M^º; Hernández, E. y Bayo, E.
- Variabilidad del periodo propio de los edificios de hormigón armado según sus características constructivas
Caselles, J.O.; Espinoza, F.; Muñoz, F.; Lana, X; Sánchez, J.; Navarro, M.; Chourak, M. y **De La Cruz, Servio Tulio**
- Comportamiento sísmico de los puentes metálicos. Los terremotos de Northridge y Kobe
Hernández Montes, Enrique; Gil, L.M.; Bayo, E. y Rúa, E.

ÍNDICE DE PONENCIAS

1.- Sismotectónica y Sismicidad

- 1.01.- Neotectónica y tectónica activa en la depresión pliocuaternaria del Segura (Murcia-Orihuela)
Rodríguez Estrella, T.; Hernández Enrile, J.L. y Ibargüen, J.
p.p. 53 - 63
- 1.02.- Estructura superficial de Andalucía y Mar de Alboran a partir de ondas Rg de corto periodo
Chourak, M; Navarro, M; Corchete, V. y Badal, J.I.
p.p. 65 - 73
- 1.03.- Segmentacion tectonica de la falla de Alhama de Murcia y actividad paleosismica asociada. contribucion a la determinacion de la peligrosidad sísmica en la region de Murcia
Martínez-Díaz, José J. y Hernández Enrile, José L.
p.p. 75 - 87
- 1.04.- Análisis paleosismológico de una falla sismogénica sin registro histórico: la falla de El Camp (Cadenas Costeras Catalanas)
Masana, E.; Villamarín, J.A. y Santanach P.
p.p. 89 - 97
- 1.05.- Catálogo de tsunamis en las costas españolas
Izquierdo, A. y Tordesillas, J.M.
p.p. 99 - 107
- 1.06.- Catálogo de sismicidad: Volumen I del Atlas Sísmico de Catalunya
Susagna, T.; Goula, X. y Roca, A.
p.p. 109 - 117
- 1.07.- Una metodología para mejorar la configuracion geométrica de redes sismicas locales. aplicaciones en Ingeniería Civil
Lindo-Ñaupari, R.; Herraiz, M. y Vadillo, O.
p.p. 119 - 127
- 1.08.- Cuantificación de deformaciones recientes mediante datos de nivelación de precisión en el Sureste peninsular
Giménez, J.; Goula, X y Suriñach, E.
p.p. 129 - 138
- 1.09.- Estructura anelastica de dos regiones hercínicas de la Peninsula Ibérica obtenidas a partir de distintos algoritmos de inversion
Olarte, J.; Lana, X. y Canas, J. A.
p.p. 139 - 148

5.- Normativa

- 5.01.- Nueva normativa sobre criterios sísmicos, geológicos e ingenieriles en el emplazamiento de cc. nn.
Jiménez Juan, A. y Sánchez Cabañero, J.G
p.p. 367 - 374
- 5.02.- Comparación de la fiabilidad estructural resultante al aplicar distintas normativas en el campo de la ingeniería civil y de instalaciones industriales
Ordoñez Villalobos, Arturo
p.p. 375
- 5.03.- El método de los elementos finitos para el análisis sísmico de estructuras conforme a la norma española NCSE-94 y Eurocódigo 8
Moreno Fernández de Yepes, Miguel Ángel y Lancha Fernández, Juan Carlos
p.p. 377 - 381
- 5.04.- Nuevas aportaciones para el calculo de la atenuacion sismica en la zona de Azores-Gibraltar. Implicaciones en la actual norma sismorresistente
Martínez Solares, J.M. y López Arroyo, A.
p.p. 383 - 391

6.- Dinámica de Suelos

- 6.01.- Evaluacion de la respuesta sismica del suelo por el metodo "Reference Spectral Ratio" y su aplicacion en las playas de Sudáfrica
Fernández Julián, L.M. y Brandt, M.B.C.
p.p. 395 - 404
- 6.02.- Evaluación analítica del potencial de licuefacción
Martínez, Francisco; Martí, Joaquín y Simic, Davor
p.p. 405 - 415
- 6.03.- Una técnica numérica para la determinación de rigideces dinámicas de cimentaciones sobre suelos saturados
Aznáres, J.; Maeso, O. Y Chirino, F.
p.p. 417 - 425
- 6.04.- El método de los Elementos de Contorno aplicado a la cuantificación del efecto local
Álvarez Rubio, S. y Alarcón, E.
p.p. 427 - 434
- 6.05.- Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores
Alfaro, A.; Egozcue, J.J. y Ugalde, A.
p.p. 435 - 441
- 6.06.- Zonificacion sismica de la cuenca de Alcoy mediante un Sistema de Informacion Geografico
García Mayordomo, J.
p.p. 443 - 450

UNA TÉCNICA NUMÉRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE RIGIDECES DINÁMICAS DE CIMENTACIONES SOBRE SUELOS SATURADOS

Autores: J. Aznárez, O. Maeso y F. Chirino

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Las Palmas de G.C.
Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de G.C. E-mail: maeso@cicei.ulpgc.es*

RESUMEN

Se presenta un modelo tridimensional de Elementos de Contorno para la determinación de las rigideces dinámicas de cimentaciones superficiales sobre suelos poroelásticos saturados. El comportamiento dinámico del medio poroso se representa de acuerdo a la teoría de Biot. La cimentación se supone rígida y sin masa siendo las condiciones de contacto permeables o impermeables. Con la técnica desarrollada se determinan rigideces dinámicas de cimentaciones superficiales sobre un semiespacio poroelástico o sobre un estrato poroelástico que descansa en una base de rigidez variable. El modelo presentado es capaz de representar casos más generales en cuanto a propiedades y geometría que los existentes hasta el momento.

Palabras clave: Cimentaciones, Rigidez Dinámica, Poroelasticidad, Elementos de Contorno.

SUMMARY

A three-dimensional Boundary Element model for the computation of dynamic stiffnesses of foundations resting on fluid-filled poroelastic soils is presented. The dynamic behavior of the porous medium is represented according to Biot's theory. Foundations are assumed to be rigid and massless. The contact conditions can be pervious or impervious. The technique is applied to the computation of dynamic stiffnesses of foundations resting on a poroelastic half-space or on a poroelastic stratum based on a rigid or compliant base. The model presented is able to represent more general cases than do the existing approaches.

Key words: Foundations, Dynamic Stiffnesses, Poroelasticity, Boundary Element.

Introducción

La determinación de la rigidez de cimentaciones (relación fuerza-desplazamiento en la interfase) es un aspecto importante en el análisis de la respuesta dinámica de estructuras. En la mayoría de los estudios realizados hasta el momento, se considera el terreno como un medio viscoelástico, p.e. Alarcón et al. (1989) y Domínguez y Abascal (1989). En el presente artículo se analiza el comportamiento de cimentaciones superficiales sobre terrenos saturados de agua. El medio se considera homogéneo y constituido por dos fases, un esqueleto sólido y un medio fluido que ocupa sus intersticios.

El comportamiento dinámico del medio poroelástico se analiza de acuerdo a la teoría de Biot (1956a y b). Basándose en la misma, Halpern y Christiano (1986) obtienen la flexibilidad vertical y de cabeceo de cimentaciones superficiales tridimensionales rígidas sobre semiespacio integrando funciones de Green sobre elementos en los que dividen la interfase cimentación-terreno. Posteriormente, Kassir y Xu (1988) realizan un análisis similar para problemas bidimensionales. Más recientemente, Bougacha et al. (1993) estudian estratos poroelásticos bidimensionales utilizando el MEF, obteniendo también la impedancia dinámica de cimentaciones superficiales rígidas. Haciendo ya uso del MEC, Chen y Dargush (1995) y Chopra y Dargush (1995) obtienen valores de rigidez dinámica para cimentaciones tridimensionales los primeros y en problemas con simetría de revolución los segundos.

Recientemente, Japón et al. (1997) presentan un modelo bidimensional de Elementos de Contorno para el cálculo de rigideces dinámicas basado en la formulación para medios poroelásticos presentada por Domínguez (1992) que desarrolla la formulación integral del método a partir de la ecuaciones de Biot.

Objetivos

En el presente artículo se presenta un modelo tridimensional de Elementos de Contorno de acuerdo a la formulación ya referida de Domínguez (1992), que permite obtener la rigidez dinámica de cimentaciones sobre un semiespacio o estrato poroelástico que descansa sobre una base de rigidez variable. Los resultados presentados aquí se refieren a cimentaciones superficiales rígidas si bien el modelo permite el análisis de configuraciones más complejas (cimentaciones enterradas, rígidas o flexibles de geometría cualquiera). Los resultados proporcionados por el modelo se han comparado previamente con los obtenidos por algunos de los autores referidos, en los casos que ello es posible, obteniéndose una buena coincidencia. Se realiza también un estudio paramétrico sobre la influencia que tiene en la respuesta la variación de algunas características del medio.

Elementos de Contorno

El modelo presentado parte de la ecuación integral obtenida por Domínguez (1992) que luego de discretizar el contorno del problema en elementos cuadriláteros y triangulares cuadráticos, adopta la expresión:

$$c^i u^j + \sum_{j=1}^{NE} \left(\int_{\Gamma_j} p^* \Phi d\Gamma \right) u^j = \sum_{j=1}^{NE} \left(\int_{\Gamma_j} u^* \Phi d\Gamma \right) p^j \quad (1)$$

donde u^* y p^* constituyen la solución fundamental del problema y NE el número de elementos de la discretización. Esta ecuación, escrita para todos los nodos de la discretización permite obtener el sistema de ecuaciones:

$$H u = G p \quad (2)$$

donde u y p contienen todos los valores nodales del problema. Así, $u = 4N$ es un vector cuyos términos representan las tres componentes del desplazamiento en el esqueleto sólido del material y la tensión equivalente en el fluido que llena los intersticios del mismo. De otro lado, $p = 4N$ contiene las tres componentes de la tensión en el esqueleto y el flujo del fluido a través del contorno. La aplicación de las condiciones de contorno a las superficies que determinan el problema permiten obtener las variables incógnita en todos los nodos de la discretización: interfase cimentacion-suelo (movimiento conocido), superficie libre (tension nula en ambas fases) e interfase estrato-base flexible (interacción rigurosa entre ambos medios).

Detalles sobre el Método de los Elementos de Contorno aplicado a problemas poroelásticos pueden verse en Domínguez (1993).

Rigidez Dinámica de Cimentaciones Superficiales

Como se comentó anteriormente, la determinación de este parámetro representa un aspecto importante del análisis dinámico de estructuras. Así, para una excitación armónica de frecuencia cualquiera, la matriz de rigidez dinámica relaciona el vector de fuerzas y momentos

aplicado a la cimentación y el vector desplazamiento resultante considerada ésta como un sólido rígido sin masa.

$$R = K u \quad (3)$$

Cada término K_{ij} de la matriz de rigidez representa la fuerza o momento resultante en la coordenada i ante un desplazamiento unitario armónico en la dirección j , siendo un número complejo que puede expresarse como sigue:

$$K_{ij} = Re (K_{ij}) + i Im (K_{ij}) \quad (4)$$

donde la parte real se encuentra relacionada con la rigidez del terreno y la parte imaginaria se encuentra vinculada al amortiguamiento del mismo.

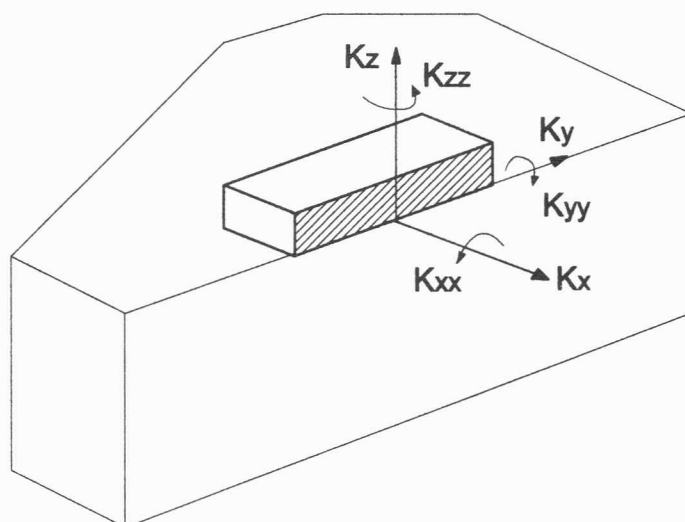


Fig.1 Cimentación superficial tridimensional

En los apartados siguientes, presentaremos algunos resultados obtenidos para los términos diagonales correspondientes a cimentaciones de geometría cuadrada y que tienen que ver con los movimientos vertical (K_z), horizontal (K_x) y de cabeceo (K_{yy}) respectivamente (Fig.1).

Cimentaciones Superficiales sobre Semiespacio

En este punto se definen las propiedades del material poroelástico utilizado en nuestro análisis. El mismo se corresponde con una arena densa y fue ya utilizado por Kassir y Xu (1988) o Japón et al (1997). Módulo de elasticidad transversal del esqueleto sólido $G = 3.2175 \times 10^7$ N/m², módulo de Poisson $\nu = 0.25$, porosidad $\phi = 0.35$, densidad del sólido $\rho_s = 1.425$ Kg/m³, densidad del fluido $\rho_f = 1.000$ Kg/m³, densidad añadida (ρ_a) nula y constantes de Biot $Q = 4.61 \times 10^8$ N/m² y $R = 2.4823 \times 10^8$ N/m². Las Figuras 2, 3 y 4 muestran la parte real e imaginaria de las impedancias vertical, horizontal y de cabeceo de una cimentación superficial cuadrada de lado $2B$ sobre un semiespacio de estas características, frente a la frecuencia adimensional a_ω .

En estas figuras se consideran dos coeficientes de permeabilidad diferentes, $k = 10^{-3}$ (constante de disipación $b = 1.1986 \times 10^6 \text{ Ns/m}^4$) y otro cien veces mayor. La cimentación es impermeable y se supone soldada al terreno. En este caso sólo es necesario discretizar la interfase cimentación-terreno. Los resultados obtenidos indican un aumento de la rigidez en todos los casos y en todo el rango de frecuencias estudiado especialmente llamativo en la componente imaginaria con el aumento de la frecuencia.

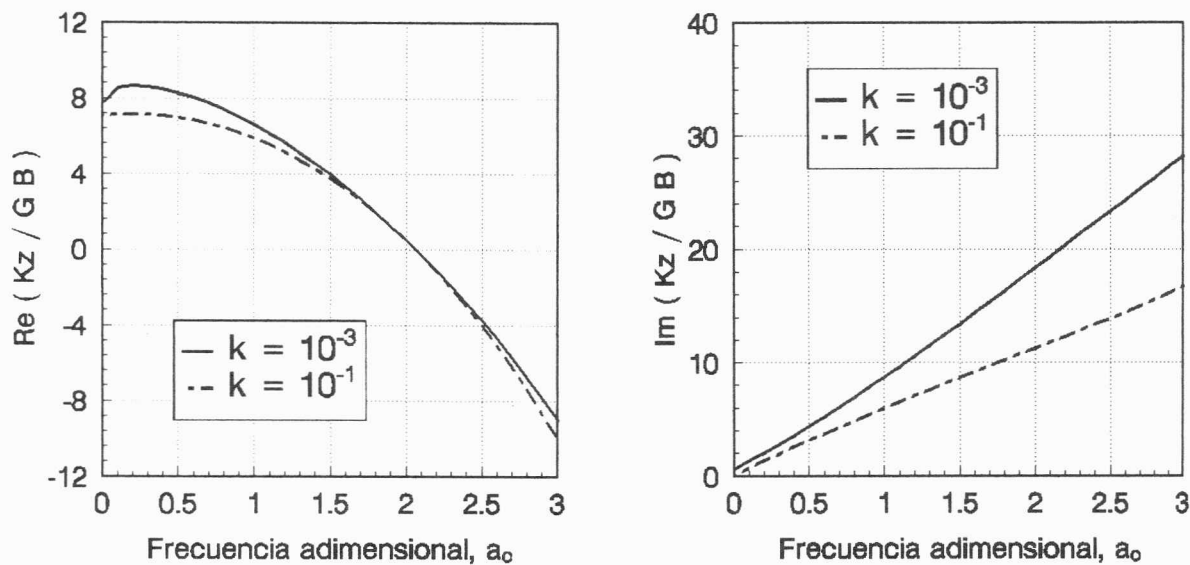


Fig.2. Componentes real e imaginaria de la impedancia vertical. Cimentación superficial sobre semiespacio.

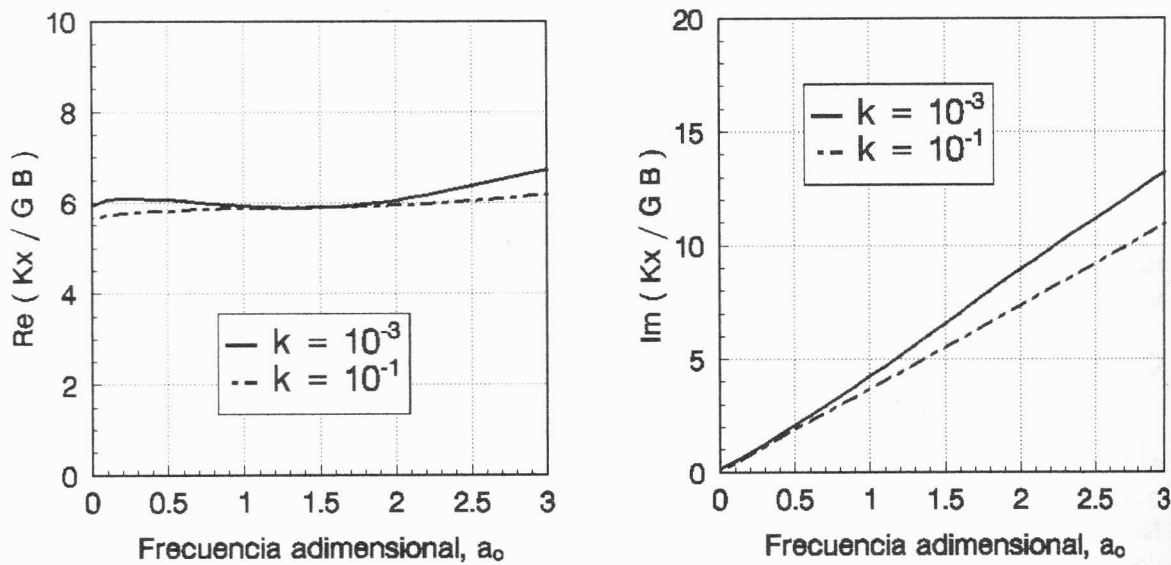


Fig.3. Componentes real e imaginaria de la impedancia horizontal. Cimentación superficial sobre semiespacio.

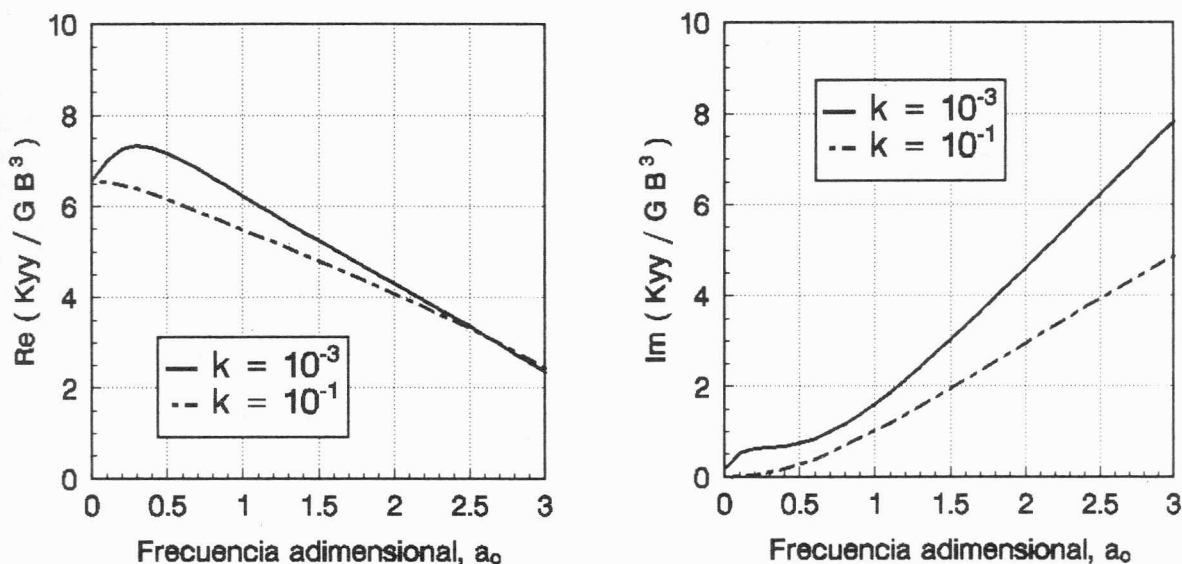


Fig.4. Componentes real e imaginaria de la impedancia de cabeceo. Cimentación superficial sobre semiespacio.

Se analizó el efecto que sobre el modelo analizado provoca $p_a \neq 0$ (150 Kg/m^3) o un factor de amortiguamiento (5%) en el esqueleto sólido. La influencia de ambos factores es poco importante cuando $k = 10^{-3} \text{ m/s}$ y comienza a hacerse patente cuando la permeabilidad crece.

La influencia de las condiciones de permeabilidad de la interfase cimentación-terreno se presenta en la Figura 5. En la misma se dibujan las componentes reales de las impedancias vertical y horizontal para condiciones de contacto permeables e impermeables. La diferencia entre ambos problemas es importante para la componente vertical especialmente en el rango de altas frecuencias y, como cabía esperar, inapreciable en la impedancia horizontal.

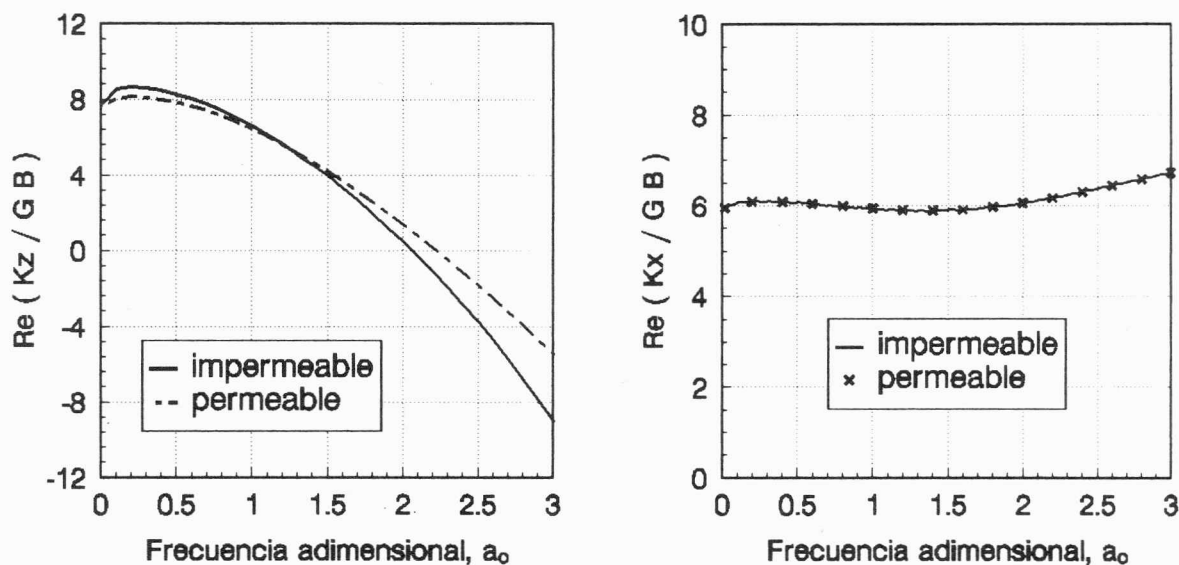


Fig.5. Influencia permeabilidad superficie de contacto. Componente real impedancias vertical y horizontal. Cimentación superficial sobre semiespacio.

Cimentaciones Superficiales sobre Estrato

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para una cimentación superficial sobre un estrato poroelástico de profundidad variable. En principio, se considera la base infinitamente rígida. Las propiedades del medio son las utilizadas en el apartado anterior con $\rho_a=150\text{ Kg/m}^3$ y un amortiguamiento del 5% para el material que constituye el esqueleto sólido. En este caso es necesario discretizar la superficie libre de tensiones y, lógicamente, la base del estrato. La cantidad de superficie libre a discretizar depende del tipo de problema que se analice pero nunca será inferior a cuatro veces el semiancho de la cimentación. Aprovechando la simetría del problema, se discretizará sólo un cuarto de la geometría. La utilizada para la obtención de la componente horizontal de la impedancia aparece en la Figura 6.

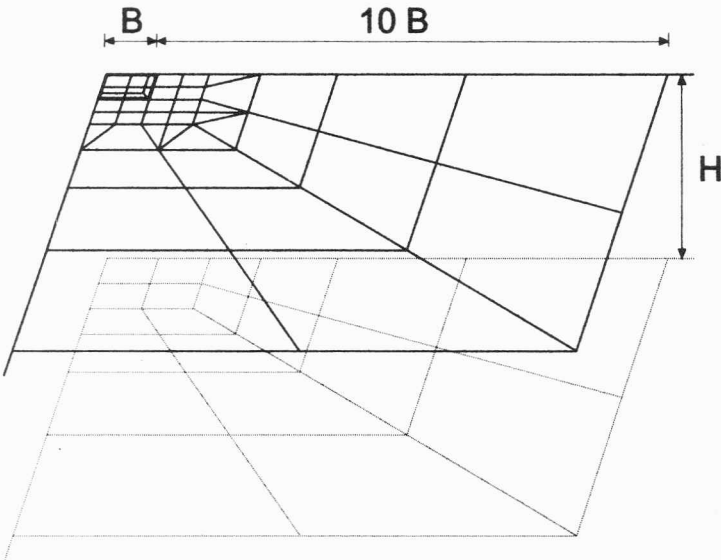


Fig.6. Cimentación cuadrada superficial sobre estrato poroelástico. Discretización.

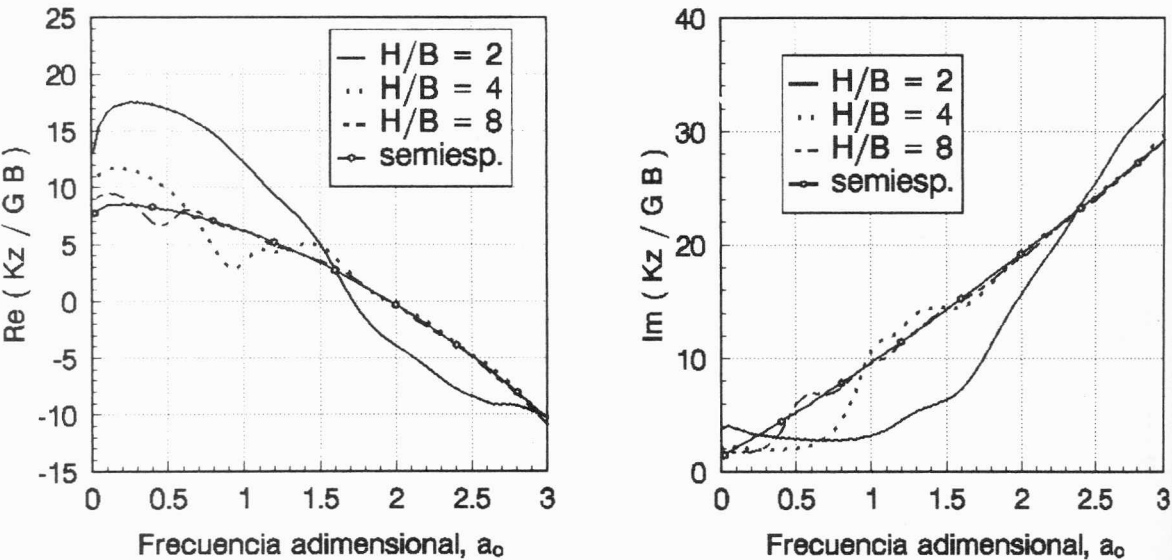


Fig.7. Componentes real e imaginaria de la impedancia vertical. Cimentación superficial sobre estrato de profundidad variable.

En las Figuras 7,8 y 9 se representan las componentes vertical, horizontal y de cabeceo correspondientes a este problema para profundidades del estrato variables. La cimentación es impermeable y se encuentra soldada al terreno. Los resultados presentan las naturales oscilaciones propias de este tipo de problemas y, como es natural, la tendencia a la solución correspondiente al semiespacio, también representada, para H/B crecientes. Este efecto es particularmente acusado en las componentes vertical y de cabeceo.

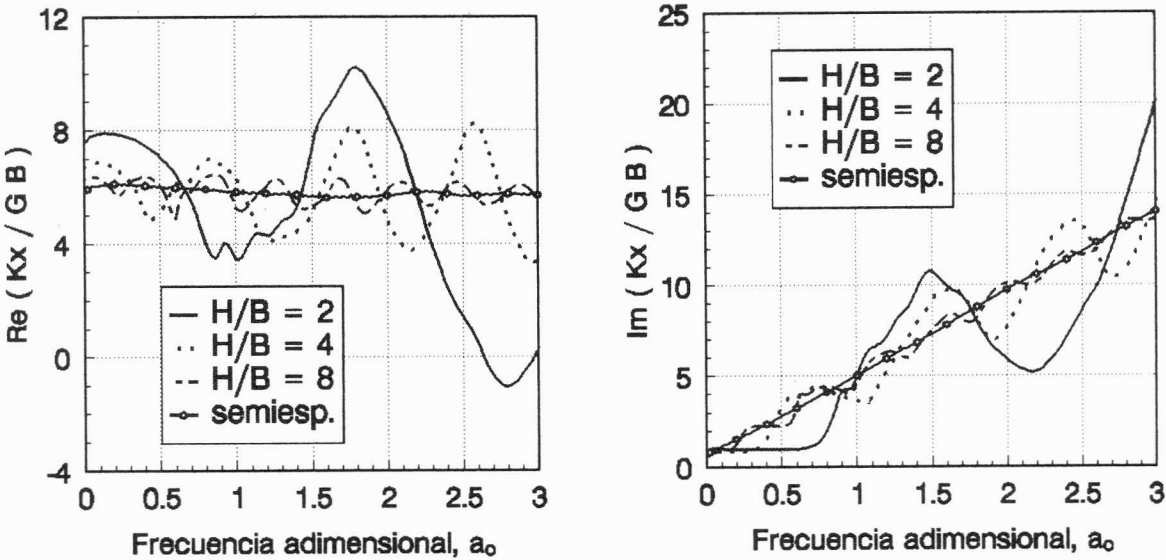


Fig.8. Componentes real e imaginaria de la impedancia horizontal. Cimentación superficial sobre estrato de profundidad variable.

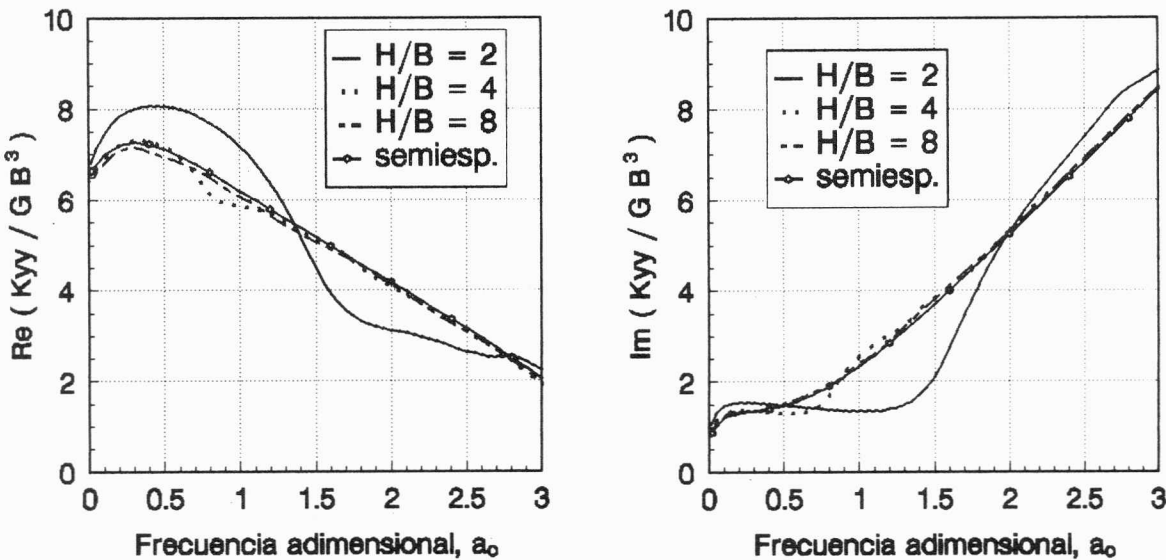


Fig.9. Componentes real e imaginaria de la impedancia de cabeceo. Cimentación superficial sobre estrato de profundidad variable.

Por último se presentan los resultados correspondientes a la impedancia horizontal de una cimentación sobre un estrato que descansa en una base viscoelástica flexible e impermeable. Se representan tres razones de rigidez entre el modulo de elasticidad transversal de la base y el esqueleto sólido del estrato ($RG = G_{base}/G_{esq.sólido} = 5, 10, 50$) junto con los correspondientes a una base rígida. La base se considera un medio elástico con la densidad del esqueleto sólido e idéntico factor de amortiguamiento (5%). La discretización utilizada es la representada en la Figura 6. La interacción entre ambos medios se modeliza de forma rigurosa. Los resultados muestran la influencia de la rigidez relativa entre medios, observándose como para valores de RG del entorno de 50 o superior, la situación es equivalente a la obtenida para una base idealmente rígida.

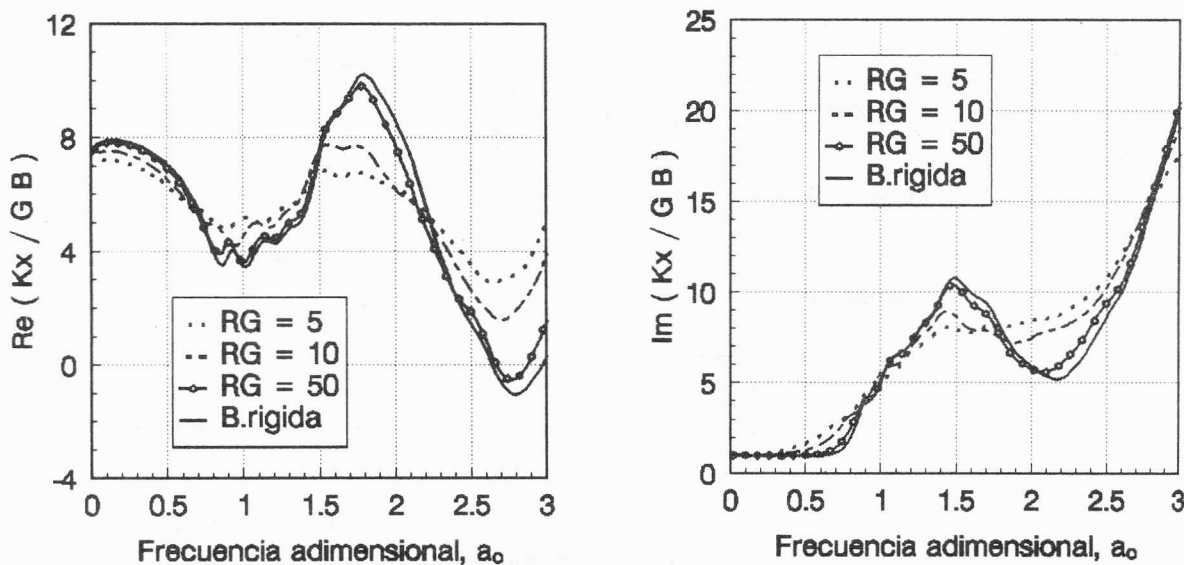


Fig.10. Componentes real e imaginaria de la impedancia de horizontal. Cimentación superficial sobre estrato que descansa en una base flexible.

Conclusiones

En este artículo se ha presentado un modelo numérico de Elementos de Contorno para la determinación de las rigideces dinámicas de cimentaciones superficiales sobre medios poroelásticos. Se analiza brevemente la influencia que la variación de algunos de los parámetros del problema tienen en la respuesta del modelo. Asimismo, permite la interacción con medios poroelásticos de propiedades diferentes o viscoelásticos y puede ser generalizado a geometrías más complicadas sin dificultad añadida.

Referencias

Alarcón E., Cano J.J. y Domínguez J. (1989), "Boundary Element Approach to the Dynamic Stiffness Functions of Circular Foundations", Int. J. Num. and Anal. Methods in Geomechanic, Vol. 13, pp. 645-664.

Biot M.A. (1956a), "Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low Frequency Range", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, pp. 168-178.

- Biot M.A. (1956b), "Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, pp. 179-191.
- Bougacha S., Tassoulas J.L. y Roësset J.M. (1993), "Analysis of Foundations on Fluid-Filled Poroelastic Stratum", J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 119, pp. 1632-1648.
- Chen J. y Dargush G.F. (1995), "Boundary Element Method for Dynamic Poroelastic and Thermoelastic Analyses", Int. J. Solids Struct., Vol. 32, pp. 2257-2278.
- Chopra M.B. y Dargush G.F. (1995), "Dynamic Analysis of Axisymmetric Foundations on a Poroelastic-Stratum Using BEM", Proc. 10th Engrg. Mech. Spec. Conf., ASCE, N.Y., Vol. 2, pp. 1046-1049.
- Domínguez J. y Abascal R. (1987), "Seismic Response of Strip Footings on Zoned Viscoelastic Soils", J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 115, pp. 913-934.
- Domínguez J. (1992), "Boundary Element Approach for Dynamic Poroelastic Problems", Int. J. Numer. Methods in Engrg., Vol. 35, pp. 307-324.
- Domínguez J. (1993), "Boundary Elements in Dynamics", Elsevier Applied Science, N.Y.
- Halpern M.R. y Christiano P. (1986), "Steady-State Harmonic Response of a Rigid Plate Bearing on a Liquid-Saturated Poroelastic Half-Space", Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 14, pp. 439-454.
- Japón B.R., Gallego R. y Domínguez J. (1997), "Dynamic Stiffness of Foundations on Saturated Poroelastic Soils", J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 123, pp. 1121-1129.
- Kassir M.K. y Xu J. (1988), "Interaction Functions of a Rigid Strip Bounded to Saturated Elastic Half-Space", Int. J. Solids Struct., Vol. 24, pp. 915-936.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación aportada por la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica (Proyecto PB96-1322-C03-03) para la realización de este trabajo.