

Métodos Numéricos en Ingeniería 2009

Editores:

Antonio Huerta

Eugenio Oñate

Antonio Rodríguez Ferran

Isabel N. Figueiredo

Luís F. Menezes

António J.B. Tadeu



Métodos Numéricos en Ingeniería 2009

Editores:

Antonio Huerta
Eugenio Oñate
Antonio Rodríguez Ferran

Isabel N. Figueiredo
Luís F. Menezes
António J.B. Tadeu

Publicado por

SEMNI



Sociedad Española de Métodos
Numéricos en Ingeniería

APM|AC

Associação Portuguesa de Mecânica
Teórica, Aplicada e Computacional

© Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI)
Edificio C1, Campus Norte UPC Gran Capitán, s/n 08034 Barcelona, Spain
www.semni.org

Métodos Numéricos en Ingeniería 2009
A. Huerta, E. Oñate, A. Rodríguez Ferran,
I. N. Figueiredo, L. F. Menezes y A. J. B. Tadeu (Eds.)

Primera edición: Junio 2009

© Los autores

Impreso por: Artes Gráficas Torres, S.L. c/ Morales 17, 08029 Barcelona, Spain

Déposito Legal: B-28307-09

ISBN: 978-84-96736-66-5

PREFACIO

Este libro contiene los resúmenes de los trabajos presentados en el Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009, celebrado en la Universitat Politècnica de Catalunya del 29 de junio al 2 de julio de 2009. El lápiz de memoria anejo contiene los correspondientes artículos completos. Este congreso ha sido organizado conjuntamente por SEMNI (Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería) y APMTAC (Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional).

Ambas sociedades decidieron, en 2002, fusionar los dos congresos que originalmente promovían por separado. Las anteriores ediciones conjuntas de este congreso se celebraron en Madrid (2002), Lisboa (2004), Granada (2005) y Porto (2007). Los organizadores pensamos que este excelente clima de colaboración y entendimiento científico entre España y Portugal es beneficioso para todos. Cabe destacar, además, la participación en el congreso de varios investigadores latinoamericanos y prestigiosos conferenciantes plenarios de universidades norteamericanas y europeas.

El contenido de este volumen es muy amplio y refleja la importante actividad que se desarrolla en España y Portugal en el ámbito de los métodos numéricos. Las comunicaciones abordan tanto los aspectos más teóricos de los métodos numéricos como sus aplicaciones a diversos campos, tanto en mecánica de sólidos y estructuras (fractura, geomateriales, estructuras metálicas,...) como en mecánica de fluidos y problemas de ondas (fluidos no newtonianos, olas y corrientes, vibraciones y acústica,...). Cabe destacar, además, el importante número de trabajos presentados en áreas más recientes, tales como la ingeniería de tejidos humanos y los hormigones con fibras.

Todos los trabajos publicados se han reproducido directamente a partir de los archivos y manuscritos remitidos por los autores. El control e impresión de este libro se ha realizado a través del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

Para terminar, los organizadores queremos agradecer a los autores de las comunicaciones y a los coordinadores de las sesiones temáticas el esfuerzo realizado, así como su contribución al éxito del congreso.

Barcelona, junio de 2009

El Comité Organizador

SEMNI
Antonio Huerta
Eugenio Oñate
Antonio Rodríguez Ferran

APMTAC
Isabel N. Figueiredo
Luís F. Menezes
António J.B. Tadeu

DINÁMICA ESTRUCTURAL

Análisis de la Interacción Dinámica entre Estructuras Pilotadas Cercanas <i>L. A Padrón, J. J Aznárez and O. Maeso</i>	91
Aplicação Estrutural de Cortiça na Melhoria da Segurança Passiva em caso de Impacto <i>M. Paulino, F. Teixeira-Dias, C. Gameiro and J. Cirne</i>	92
Caracterização do Desempenho de Materiais Celulares no Âmbito de Crashworthiness <i>M. Paulino, F. Teixeira-Dias, C. Gameiro and J.M. Cirne</i>	93
Comportamiento Sísmico de Puentes Atirantados <i>A. Cámara Casado and M.A. Astiz Suárez</i>	94
Estabilidad del Tráfico y Vibraciones Inducidas en Puentes de Carretera mediante Modelos Dinámicos de Elementos Finitos <i>J. Oliva Quecedo, J.M. Goicolea Ruigómez, M.A. Astiz Suárez and F. Gabaldón Castillo</i>	95
Implementação de Modelos Híbridos-Mistos de Tensão para a Análise Dinâmica no Domínio do Tempo <i>M.R. Arruda and L.M. Castro</i>	96
Método das Diferenças Finitas Energéticas na Análise Dinâmica de Problemas Axissimétricos de Placas Espessas <i>F.R. Mittelbach, L.F. Garcia and W.J. Mansur</i>	97
Modelo Numérico del Comportamiento Estructural de Barras de Pandeo Restringido <i>J.C. Castro, F. López-Almansa and S. Oller</i>	98
Modelos Híbridos-Mistos de Tensão para a Análise Dinâmica e Fisicamente Não-Linear de Pórticos de Betão Armado <i>M.R. Arruda and L.M. Castro</i>	99
Simulación Numérica de Explosiones sobre Muros de Manpostería <i>A. Santos, F. Barrosa, J.J. Arribas and I. Romero</i>	101

EFFECTOS DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS FERROVIARIAS DE ALTA VELOCIDAD

A Influência das Irregularidades da Via na Resposta Dinâmica de Pontes Ferroviárias de Médio vão <i>C. Rigueiro, C. Rebelo and L. Simões da Silva</i>	105
Cargas Dinámicas en la Estructura de Vía debidas al Tráfico de Trenes de Alta Velocidad <i>M. Bermejo Castro, J.M. Goicolea Ruigómez, F. Gabaldón Castillo, C. Vale and P. Antolín Sánchez</i>	107
Influência da Rigidez do Solo no Comportamento Dinâmico de Pontes Ferroviárias de Alta Velocidade <i>J. Devesa, J. Kölfors and J. Proença</i>	108
Modelo Numérico en el Dominio del Tiempo para calcular Vibraciones ocasionadas por el Ferrocarril <i>A. Romero, P. Galvín and J. Domínguez</i>	109

DINÁMICA ESTRUCTURAL

Análisis de la Interacción Dinámica entre Estructuras Pilotadas Cercanas

Luis Alberto Padrón, Juan José Aznárez y Orlando Maeso

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI)
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, España.

Problemas ingenieriles tales como la estimación de la respuesta sísmica de cimentaciones, presas, edificios, túneles o puentes, caen dentro del campo de la interacción suelo-estructura, en el que existen numerosas contribuciones científicas. En muchas de estas contribuciones se recurre a métodos de subestructuración para analizar el comportamiento sísmico de edificios. Sin embargo, ésta no es una herramienta adecuada para estudiar otras situaciones como, por ejemplo, la interacción entre edificios cercanos a través del terreno, problema que ha recibido relativamente poca atención por parte de la comunidad científica. De hecho, ningún estudio ha sido publicado hasta el momento sobre el caso concreto de la interacción dinámica entre edificios pilotados cercanos.

Por esta razón, un modelo acoplado de elementos de contorno y elementos finitos, previamente desarrollado para el análisis dinámico de estructuras pilotadas, ha sido utilizado para estudiar los efectos de la interacción, a través del suelo, entre estructuras pilotadas cercanas distribuidas de forma tridimensional. El código permite modelar estructuras compuestas por pilares verticales y forjados rígidos horizontales, y contempla la cimentación del edificio a través de grupos de pilotes embebidos un suelo estratificado. Los pilotes son modelados como vigas de Euler-Bernoulli haciendo uso de elementos finitos lineales, mientras que el suelo, de características viscoelásticas, se estudia a través de elementos de contorno 3D. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia.

En una primera aproximación, el problema ha sido deliberadamente simplificado para: (i) concentrar la atención en los fenómenos relacionados con la interacción estructura-suelo-estructura; y (ii) establecer un vínculo con trabajos previos en este campo. De este modo, cada edificio han sido modelado como una estructura a cortante de una sola altura, cimentada sobre un grupo de 3×3 pilotes sobre un semiespacio viscoelástico, y se ha realizado el estudio sobre un conjunto definido de configuraciones. Por lo tanto, los resultados presentados aquí no aspiran a constituir un análisis exhaustivo del problema, sino una ilustración de los fenómenos que pueden tener lugar.

Tras definir los parámetros y las propiedades seleccionadas para el estudio, se presenta un conjunto de resultados con los que se busca evaluar los efectos de la interacción estructura-suelo-estructura en la respuesta sísmica de edificios. Se ha encontrado que los efectos de interacción estructura-suelo-estructura tienen importancia en el caso de grupos de edificios con características dinámicas similares, principalmente en cuanto a la respuesta estructural en el entorno de la frecuencia fundamental del sistema. Se muestra también que, dependiendo de la distancia entre edificios adyacentes, la respuesta estructural de cada miembro del grupo puede verse tanto reducida como incrementada. A la vista de estos resultados, y dado que se ha visto que la respuesta sísmica de una estructura puede verse significativamente amplificada por la presencia de estructuras cercanas, consideramos que es necesario estudiar más detenidamente los efectos de la interacción estructura-suelo-estructura y su influencia en el riesgo sísmico de los edificios.

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DINÁMICA ENTRE ESTRUCTURAS PILOTADAS CERCANAS

Luis A. Padrón, Juan J. Aznárez y Orlando Maeso

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI)
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, España.
e-mail: {lpadron, omaeso, jaznarez}@iusiani.ulpgc.es

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, Interacción estructura-suelo-estructura, Pilotes, Respuesta sísmica, Elementos de contorno, Elementos finitos

Resumen. *La respuesta dinámica de una estructura depende de la flexibilidad de la cimentación y del suelo circundante, así como de los efectos de interacción cinemática y de la presencia de estructuras cercanas.*

Un modelo acoplado de elementos de contorno y elementos finitos, previamente desarrollado para el análisis dinámico de estructuras pilotadas, ha sido utilizado para estudiar los efectos de la interacción, a través del suelo, de estructuras pilotadas cercanas. El código permite modelar estructuras compuestas por pilares verticales y forjados rígidos horizontales. Los pilotes son modelados como vigas de Euler-Bernoulli haciendo uso de elementos finitos monodimensionales, mientras que el suelo, de características viscoelásticas, se estudia a través de elementos de contorno 3D. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia, pero se muestran también resultados temporales obtenidos a través de la FFT.

En una primera aproximación, cada edificio ha sido modelado como una estructura a cortante de una sola altura, cimentada sobre un grupo de 3×3 pilotes en un semi-espacio viscoelástico, y se ha realizado el estudio sobre un conjunto definido de configuraciones. Los resultados presentados muestran que los efectos de interacción estructura-suelo-estructura tienen importancia, al menos, en el caso de grupos de edificios con características dinámicas similares.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la respuesta dinámica de una estructura depende en gran medida de la flexibilidad de la cimentación y del suelo circundante, así como de los efectos de interacción cinemática que tienen lugar entre la cimentación y el tren de ondas incidentes [1–12]. En muchas de estas contribuciones se recurre a métodos de subestructuración para analizar el comportamiento sísmico de edificios, no siendo ésta, sin embargo, la metodología más adecuada para estudiar otras situaciones como, por ejemplo, la interacción

entre edificios cercanos a través del terreno. Efectivamente, se acepta de manera general que pueden tener lugar fenómenos de interacción a través del suelo, entre estructuras independientes, que pueden llegar a modificar significativamente la respuesta de un grupo de estructuras sometidas, por ejemplo, a excitación sísmica, por lo que se hace recomendable estudiar el riesgo asociado al agrupamiento de edificios, problema que ha recibido relativamente poca atención por parte de la comunidad científica, si bien es cierto que han sido publicado diversos artículos sobre este tema [13–20]. Aún así, ningún estudio ha sido publicado hasta el momento sobre el caso concreto de la interacción dinámica entre edificios pilotados cercanos.

Por esta razón, un modelo acoplado de elementos de contorno y elementos finitos, previamente desarrollado para el análisis dinámico de estructuras pilotadas [21,22], ha sido utilizado para estudiar los efectos de la interacción, a través del suelo, entre estructuras pilotadas cercanas distribuidas de forma tridimensional. El código permite modelar estructuras compuestas por pilares verticales y forjados rígidos horizontales, y contempla la cimentación del edificio a través de grupos de pilotes embebidos un suelo estratificado (ver fig. 1). Los pilotes son modelados como vigas de Euler-Bernoulli haciendo uso del método de los elementos finitos (MEF), mientras que el suelo, de características viscoelásticas, se estudia a través del método de los elementos de contorno (MEC). El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia, pero se muestran también resultados temporales obtenidos a través de la FFT.

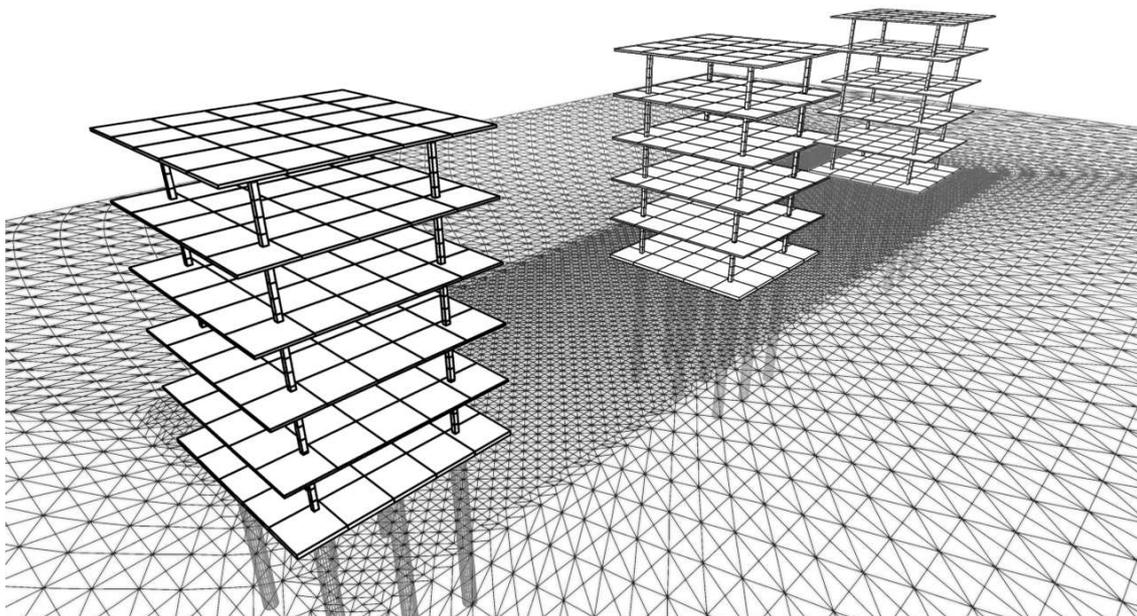


Figura 1: Grupo de edificios pilotados cercanos.

En una primera aproximación, el problema ha sido deliberadamente simplificado para: (i) concentrar la atención en los fenómenos relacionados con la interacción estructura-suelo-estructura; y (ii) establecer un vínculo con trabajos previos en este campo. De este modo, cada edificio han sido modelado como una estructura a cortante de una sola altura, cimentada sobre un grupo de 3×3 pilotes sobre un semiespacio viscoelástico, y se ha realizado el estudio sobre un conjunto definido de configuraciones. Por lo tanto, los resultados presentados aquí no aspiran a constituir un análisis exhaustivo del problema, sino una ilustración de los fenómenos que pueden tener lugar.

Tras definir los parámetros y las propiedades seleccionadas para el estudio, se presenta un conjunto de resultados con los que se busca evaluar los efectos de la interacción estructura-suelo-estructura en la respuesta sísmica de edificios ante ondas tipo S de incidencia vertical y ondas de Rayleigh. Se ha encontrado que los efectos de interacción estructura-suelo-estructura tienen importancia en el caso de grupos de edificios con características dinámicas similares, principalmente en cuanto a la respuesta estructural en el entorno de la frecuencia fundamental del sistema. Se muestra también que, dependiendo de la distancia entre edificios adyacentes, la respuesta estructural de cada miembro del grupo puede verse tanto reducida como incrementada.

2. MODELO ACOPLADO MEC-MEF

Un modelo acoplado de elementos finitos y elementos de contorno ha sido utilizado para obtener los resultados mostrados en este artículo. En dicha formulación, cada uno de los estratos del suelo es modelado a través del método de los elementos de contorno como una región lineal, homogénea, isótropa, viscoelástica y no acotada, con un módulo de elasticidad transversal complejo μ del tipo $\mu = Re[\mu](1 + 2i\beta)$, donde β es el coeficiente de amortiguamiento. La ecuación integral en el contorno para un estado elastodinámico definido en un dominio Ω_m con un contorno Γ^m puede ser escrito de forma general y condensada como

$$\mathbf{c}^t \mathbf{u}^t + \int_{\Gamma^m} \mathbf{p}^* \mathbf{u} \, d\Gamma = \int_{\Gamma^m} \mathbf{u}^* \mathbf{p} \, d\Gamma + \int_{\Omega_m} \mathbf{u}^* \mathbf{X} \, d\Omega \quad (1)$$

donde \mathbf{c}^t es el tensor del término libre en el punto de colocación \mathbf{x}^t , \mathbf{X} son las fuerzas de volumen en el dominio Ω_m , \mathbf{u} y \mathbf{p} son los vectores de desplazamientos y tensiones, y \mathbf{u}^* y \mathbf{p}^* son los tensores de la solución fundamental elastodinámica, que representan la respuesta de una región no acotada a una carga harmónica unitaria concentrada en un punto \mathbf{x}^t y con una variación temporal del tipo $e^{i\omega t}$.

En gran número de aplicaciones, se considera que la fuerzas de volumen \mathbf{X} son nulas. De aquí en adelante, por contra, se considerará que la interacción pilote-suelo se produce, desde el punto de vista de la ecuación integral, a través de fuerzas internas puntuales situadas en la punta de los pilotes y de líneas de carga repartidas a lo largo del eje de los pilotes. Se considera, por tanto, que la continuidad del suelo no se ve alterada por la

presencia de los pilotes. De acuerdo con estas hipótesis, la ec. (1) puede ser escrita como

$$\mathbf{c}^t \mathbf{u}^t + \int_{\Gamma^m} \mathbf{p}^* \mathbf{u} d\Gamma = \int_{\Gamma^m} \mathbf{u}^* \mathbf{p} d\Gamma + \sum_{j=1}^{n_{ll}^m} \left[\int_{\Gamma_{p_j}^m} \mathbf{u}^* \mathbf{q}^{s_j} d\Gamma_{p_j} - \delta_j \Upsilon_k^j F_{p_j} \right] \quad (2)$$

donde $\Gamma_{p_j}^m$ es la interfase pilote-suelo a lo largo de la línea de carga j en el interior del dominio Ω_m ; n_{ll}^m es el número total de líneas de carga en el dominio Ω_m ; \mathbf{q}^{s_j} son las tensiones en la interfase pilote-suelo, actuando sobre el suelo; δ_j toma valor unitario si la línea de carga j contiene a la punta de un pilote flotante, o toma el valor cero en caso contrario; y Υ_k^j es un vector de tres componentes que representa la contribución de la fuerza axial F_{p_j} en la punta de la línea de carga j -ésima.

Los contornos Γ^m son discretizados por medio de elementos cuadráticos triangulares o cuadriláteros con seis o nueve nodos, respectivamente. Cuando los contorno han sido discretizados, la ec. (2) puede ser escrita para cada región Ω_m , en todos los nodos sobre Γ^m con el fin de obtener una ecuación matricial del tipo

$$\mathbf{H}^{ss} \mathbf{u}^s - \mathbf{G}^{ss} \mathbf{p}^s - \sum_{j=1}^{n_{ll}^m} \mathbf{G}^{sp_j} \mathbf{q}^{s_j} + \sum_{j=1}^{n_{ll}^m} \delta_j \Upsilon^{s_j} F_{p_j} = 0 \quad (3)$$

donde \mathbf{u}^s y \mathbf{p}^s son los vectores de desplazamientos y tensiones nodales de los elementos de contorno; \mathbf{H}^{ss} y \mathbf{G}^{ss} son las matrices de coeficientes obtenidas de la integración numérica sobre los elementos de contorno del producto de la solución fundamental por las funciones de forma correspondientes; y \mathbf{G}^{sp_j} es la matriz de coeficientes obtenida de la integración numérica sobre la línea de carga j del producto de la solución fundamental por las funciones de interpolación de los pilotes, cuando la carga unitaria está aplicada sobre Γ^m .

Por otro lado, la ec. (2) será también aplicada sobre los puntos internos que pertenecen a la línea de carga $\Gamma_{p_i}^m$, lo que lleva a la siguiente expresión:

$$\mathbf{c} \mathbf{u}^{p_i} + \mathbf{H}^{p_i s} \mathbf{u}^s - \mathbf{G}^{p_i s} \mathbf{p}^s - \sum_{j=1}^{n_{ll}^m} \mathbf{G}^{p_i p_j} \mathbf{q}^{s_j} + \sum_{j=1}^{n_{ll}^m} \delta_j \Upsilon^{p_i j} F_{p_j} = 0 \quad (4)$$

donde $\mathbf{H}^{p_i s}$ y $\mathbf{G}^{p_i s}$ son matrices de coeficientes obtenidas a través de la integración numérica sobre los elementos de contorno del producto de la solución fundamental por las funciones de forma correspondientes; y $\mathbf{G}^{p_i p_j}$ es la matriz de coeficientes obtenida a través de la integración numérica sobre la línea de carga j del producto de la solución fundamental por las funciones de interpolación de los pilotes, cuando la carga unitaria está aplicada sobre la línea de carga $\Gamma_{p_i}^m$. Aquí, \mathbf{u}^{p_i} es el vector de desplazamientos nodales de la línea de carga i , el cual es multiplicado por el vector \mathbf{c} , que toma el valor 1/2 en posiciones correspondientes a nodos del pilote localizados sobre un contorno suave (como en el caso de las cabezas de los pilotes) o toma un valor unitario en los puntos internos. Hay que

tener en cuenta que la posición del nodo que define la cabeza del pilote puede coincidir con la posición de algún nodo de la superficie. En este caso existirán dos nodos con idénticas coordenadas espaciales. Entonces, dos de las ecuaciones del sistema, la escrita para el nodo de la superficie y la escrita para el nodo de la línea de carga, serán equivalentes, pero el término libre ocupará diferentes posiciones en la matriz de coeficientes, lo que evitará que se tenga un sistema de ecuaciones singular.

Por otro lado, los pilotes son modelados, haciendo uso del método de los elementos finitos, como elementos verticales de acuerdo a la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, y son discretizados utilizando elementos de tres nodos que han sido definidos de manera que sea posible aproximar la deformada del pilote con un número bajo de elementos. Se definen 13 grados de libertad sobre dicho elemento: un desplazamiento vertical y dos desplazamientos horizontales en cada nodo, y además, dos rotaciones θ en cada uno de los nodos extremos, uno alrededor del eje x_1 y otro alrededor del eje x_2 . Para ello, el comportamiento elástico armónico de los pilotes, considerados como vigas monodimensionales, es descrito por una ecuación del tipo

$$\bar{\mathbf{K}} \mathbf{u}^p = \mathbf{F}^{ext} + \mathbf{Q} \mathbf{q}^p \quad (5)$$

donde $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}$, siendo \mathbf{M} y \mathbf{K} las matrices de masa y rigidez del pilote, \mathbf{u}^p el vector que contiene las amplitudes de las traslaciones y rotaciones nodales, \mathbf{F}^{ext} el vector que contiene las amplitudes de las fuerzas y momentos nodales externos aplicados sobre el pilote, ω la frecuencia angular de la excitación, y \mathbf{Q} la matriz que transforma las tensiones en fuerzas nodales equivalentes.

Nótese que, dado que se asume que la continuidad del suelo no se ve alterada por la presencia de los pilotes, el valor de la masa distribuida asignado a cada pilote debe ser modificado según la expresión $\bar{m} = A(\rho_p - \rho_s)$, con el objetivo de no sobrestimar la masa total del sistema, siendo ρ_p y ρ_s las densidades del pilote y del suelo.

El siguiente paso es la construcción de un sistema de ecuaciones global a partir de las expresiones deducidas hasta aquí. El acoplamiento será realizado a través de las tensiones $\mathbf{q}^{sj} = -\mathbf{q}^{pj}$ a lo largo de la interfase pilote-suelo y de los desplazamientos \mathbf{u}^{pj} a lo largo del pilote j .

La ec. (5), escrita para el pilote j , puede ser expresada ahora como

$$\bar{\mathbf{K}}^{pj} \mathbf{u}^{pj} - \mathbf{F}_{pj} + \mathbf{Q} \mathbf{q}^{sj} = \mathbf{F}_{top}^j \quad (6)$$

Imponiendo condiciones de compatibilidad y equilibrio soldados a lo largo de las interfases pilote-suelo, y tomando como criterio de signos que las tensiones \mathbf{q}^s son positivas, las ecuaciones (3), (4) y (6) puede ser reordenadas en un único sistema de ecuaciones que representará al sistema suelo estratificado – cimentación pilotada. Para un semiespacio uniforme, el sistema acoplado será de la forma

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}^{ss} & -\mathbf{G}^{sp} & \mathbf{\Upsilon}^s & \emptyset \\ \mathbf{H}^{ps} & -\mathbf{G}^{pp} & \mathbf{\Upsilon}^p & \mathbf{C}' \\ \emptyset & \mathbf{Q} & \mathbf{I}' & \bar{\mathbf{K}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^s \\ \mathbf{q}^s \\ \mathbf{F}_p \\ \mathbf{u}^p \end{bmatrix} = \mathcal{B} \quad (7)$$

donde \mathcal{B} es el vector del lado derecho. En el caso de dominios estratificados, la estructura del sistema de ecuaciones es la misma, aunque deben imponerse también condiciones de equilibrio y compatibilidad soldados sobre todas las interfases del problema.

Se describe a continuación la formulación que ha sido adoptada para el análisis dinámico de estructuras pilotadas compuestas por uno a más pilares verticales extensibles y uno o más forjados horizontales infinitamente rígidos, tal y como se muestra en la fig. 2. Los pilotes son modelados como vigas de Euler-Bernoulli sin masa, con deformación axial y lateral, y con amortiguamiento de tipo viscoelástico, introducido a través de un módulo de rigidez complejo del tipo $k = Re[k](1 + 2i\zeta)$. La rigidez torsional de los pilares es despreciada. Se considera que los ejes principales de inercia de los forjados rígidos son paralelos a los ejes de coordenadas, aunque la posición de sus centros de gravedad en el plano horizontal puede variar entre distintas plantas.

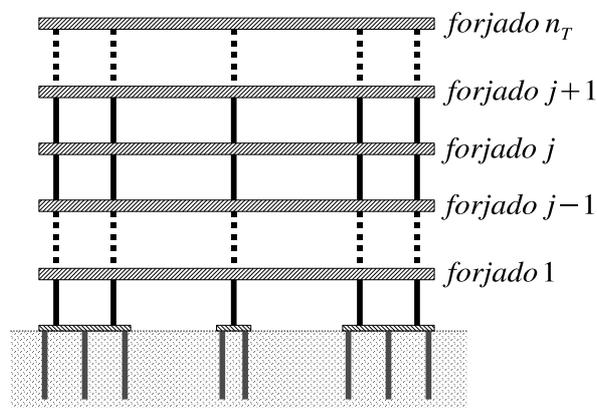


Figura 2: Esquema bidimensional del modelo de estructuras pilotadas

Con el objetivo de escribir las ecuaciones de movimiento directamente en función de los desplazamientos y rotaciones de los forjados (parámetros de mayor interés en este trabajo), todos los grados de libertad correspondientes a los extremos de los pilares son condensados al centro de gravedad del forjado o del encepado situado a su mismo nivel. Tras definir una matriz de rigidez de la entreplanta con carácter genérico, puede seguirse el procedimiento de ensamblaje usual del método de los elementos finitos para obtener la ecuación de movimiento de la estructura una vez discretizada, quedando de la forma

$$(\mathcal{K} - \omega^2 \mathcal{M}) \mathcal{X} = \mathcal{F} \quad (8)$$

donde \mathcal{K} es la matriz de rigidez global de la estructura, \mathcal{X} es el vector de desplazamientos y rotaciones en los forjados, \mathcal{F} es el vector de fuerzas externas sobre la estructura y \mathcal{M} es la matriz de propiedades inerciales de la estructura, definida para cada forjado.

La manera en que las ecuaciones (5), (3), (4) y (8) son reorganizadas en un único sistema de ecuaciones depende de la configuración de estructuras, cimentaciones y suelos, y

de las condiciones de contorno. Sin embargo, siempre deben aplicarse las condiciones de equilibrio y de compatibilidad, considerando contacto soldado entre las diferentes interfases del sistema. En la situación más general, existen múltiples estructuras cimentadas sobre diferentes grupos de pilotes que están embebidos en suelos estratificados, y el sistema está siendo sometido a fuerzas externas o a ondas sísmicas. En tal caso, el sistema de ecuaciones es

$$\mathcal{A} \{ \mathbf{u}^s, \mathbf{p}^s, \mathbf{q}^s, \mathbf{F}_p, \mathbf{u}^p, \mathbf{X}^j, \mathbf{F}_{top}, \mathbf{f}_o \}^T = \mathcal{B} \quad (9)$$

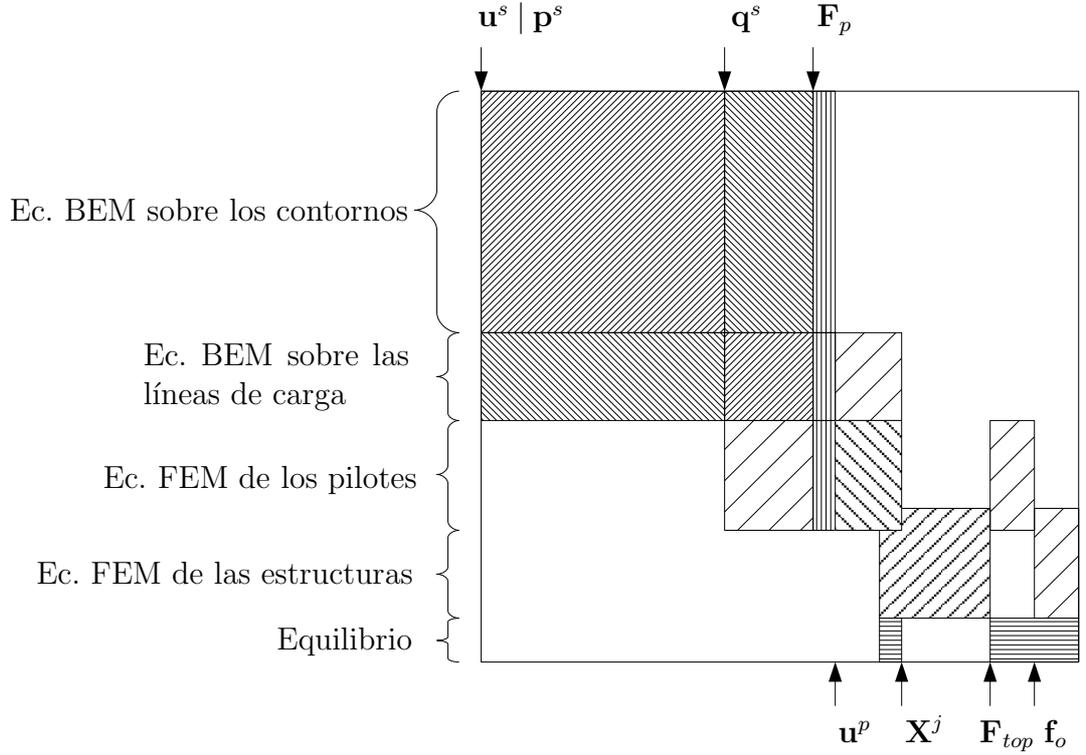


Figura 3: Estructura de la matriz de coeficientes \mathcal{A} del sistema

donde \mathcal{A} es la matriz de coeficientes (cuya estructura está esquematizada en la fig. 3) y \mathcal{B} es el vector del lado derecho, ambos obtenidos después de aplicar las condiciones de contorno y de reordenar las ecuaciones. El vector de incógnitas incluye los desplazamientos \mathbf{u}^s y/o las tensiones \mathbf{p}^s en los nodos correspondientes a los elementos de contorno, las tensiones en la interfase pilote-suelo \mathbf{q}^s , las fuerzas en la punta de los pilotes \mathbf{F}_p , las traslaciones y rotaciones nodales a lo largo del pilote \mathbf{u}^p , los grados de libertad definidos en las superestructuras \mathbf{X}^j , las reacciones en las uniones pilote-encepado \mathbf{F}_{top} , y las fuerzas en la base de la estructura \mathbf{f}_o .

3. RESULTADOS

3.1. Definición del problema

El sistema a estudiar está compuesto por varias estructuras a cortante de una sola altura, situadas relativamente cerca las unas de las otras, y cimentadas cada una de ellas sobre un grupo de 3×3 pilotes embebidos en un semiespacio de naturaleza viscoelástica. Un esquema del problema puede verse en la fig. 4, donde se muestran los parámetros geométricos utilizados en la definición de los edificios. Por su parte, los grupos de pilotes están definidos por la longitud L y el diámetro d de los pilotes, la distancia entre centros de pilotes adyacentes s , y el semiancho de la cimentación b , cumpliéndose en este caso que $b = s$. El resto de los parámetros son: distancia entre los centros de cimentaciones adyacentes D , período fundamental T y coeficiente de amortiguamiento estructural ζ para la estructura sobre base rígida, masa m_o y momento de inercia I_o del encepado rígido, y por último, la altura h y la masa m efectivas adoptadas para caracterizar el comportamiento dinámico de la estructura. La distancia D entre los centros de encepados adyacentes será expresada como una fracción de la longitud de onda de corte a la frecuencia fundamental del sistema $\lambda = c_s \tilde{T}$, siendo c_s la velocidad de la onda de corte en el suelo.

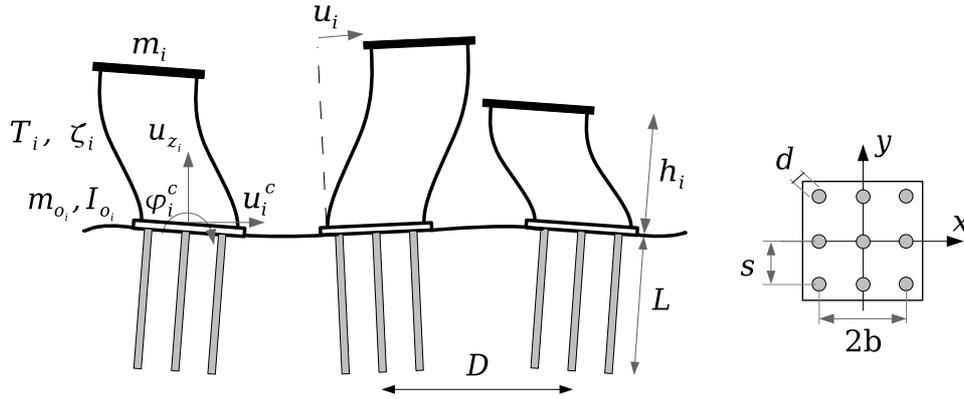


Figura 4: Definición geométrica del problema

En este trabajo, a modo de primera aproximación, y con el objetivo de centrarse en los fenómenos de interacción estructura-suelo-estructura, las superestructuras son modeladas como estructuras a cortante que se comportarían como sistemas de un grado de libertad sobre base rígida. Sin embargo, este modelo puede ser entendido también como una aproximación al primer modo de una estructura multi-modal. De este modo, h , m y ζ deben ser entendidos como la altura, la masa y el coeficiente de amortiguamiento equivalentes para el primer modo. Por otro lado, nótese que la fig. 4 es una representación bidimensional del modelo tridimensional utilizado. Se consideran, pues, ocho grados de

libertad para definir el comportamiento de cada subsistema cimentación-superestructura: dos deformaciones laterales u de la estructura, dos desplazamientos horizontales u^c de la cimentación, un desplazamiento vertical u_z , dos giros φ alrededor de los ejes horizontales, y un giro ϕ alrededor del eje vertical. Nótese también que, debido a que se ha modelado el edificio como una estructura a cortante, los desplazamientos verticales del encepado y del forjado son considerados idénticos.

Se analizará el comportamiento dinámico de distintos grupos de edificios, sometidos a ondas S de incidencia vertical (produciendo desplazamientos a lo largo del eje y), o a ondas de Rayleigh (propagándose a lo largo del eje y desde $y < 0$ hacia $y > 0$). Para ello, la respuesta de cada una de las estructuras de un grupo es comparada con la de una sola estructura sin más construcciones alrededor. De este modo, se investigará la importancia de los efectos de interacción estructura-suelo-estructura sobre distintas configuraciones. Nótese que, en todas las configuraciones, la distancia D entre estructuras adyacentes es medida paralelamente a los ejes x e y , y es la misma para todas las estructuras de una misma configuración.

Las propiedades mecánicas y geométricas de la cimentación pilotada y del suelo están definidas por los siguientes parámetros: relación de separación entre pilotes $s/d = 5$, ratios entre los módulos de Young del pilote y el suelo $E_p/E_s = 100$ y 1000 , ratio entre las densidades del suelo y del pilote $\rho_s/\rho_p = 0,7$, relación de esbeltez de los pilotes $L/d = 15$, coeficiente de amortiguamiento del suelo $\beta = 0,05$, y coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,4$.

Por otro lado, los parámetros más importantes a la hora de definir el comportamiento dinámico de las superestructuras son: relación de esbeltez de la estructura $h/b = 2, 3$ y 4 ; ratio entre las rigideces de la estructura y del suelo $h/(T c_s) = 0,3$; y coeficiente de amortiguamiento de la estructura $\zeta = 0,05$. Otros parámetros son: momento de inercia de la cimentación $I_o = 5\%$, $2,2\%$ y $1,25\%$ de mh^2 para $h/b = 2, 3$ y 4 , respectivamente; ratio entre las masas de la estructura y del suelo $m/4\rho_s b^2 h = 0,20$; y ratio entre las masas del encepado y de la estructura $m_o/m = 0,25$. Los valores seleccionados para estos tres últimos parámetros son considerados representativos para las construcciones usuales, y valores similares han sido utilizados con anterioridad por otros autores [5, 6, 9]. En cualquier caso, los resultados relacionados con los efectos de interacción suelo-estructura y estructura-suelo-estructura no son sensibles a la variación de tales parámetros.

3.2. Respuesta estacionaria

En esta sección se presentan resultados con el objetivo de investigar la influencia de los efectos de interacción estructura-suelo-estructura en la respuesta dinámica de estructuras pilotadas. Para ello, se analiza la respuesta sísmica horizontal de los edificios en términos de su deformación lateral espectral, definida como $\delta u = \text{Abs}[\Omega^2 u / \omega^2 u_{ff}]$, donde Ω es la frecuencia fundamental de la estructura sobre base rígida, ω es la frecuencia de excitación y u_{ff} es el desplazamiento horizontal de campo libre en la superficie. El producto de esta variable δu por la masa de la estructura y por la aceleración de campo libre da como resultado la amplitud de los esfuerzos cortantes que aparecen en la base de la estructura.

Los resultados serán mostrados en términos de un factor de amplificación $\delta u/\delta u_1$, siendo δu la deformación lateral de una estructura determinada de un grupo, y δu_1 el valor correspondiente a un edificio solo. Así, $\delta u/\delta u_1 > 1$ implica que la presencia de estructuras cercanas amplifica la respuesta del edificio en cuestión a una cierta frecuencia, mientras que $\delta u/\delta u_1 < 1$ implicaría un efecto beneficioso del agrupamiento de las estructuras. Todas las gráficas son presentadas en función de la frecuencia adimensional $a_o = \omega d/c_s$.

La fig. 5 presenta la respuesta dinámica, en términos del factor de amplificación espectral respecto a un edificio solo, de tres estructuras idénticas ante ondas tipo S de incidencia vertical, para $E_p/E_s = 1000$. Se incluyen en el estudio tres relaciones de aspecto distintas para las estructuras ($h/b = 2, 3$ y 4), siendo los valores de las frecuencias fundamentales correspondientes a estructuras solas en dicho suelo $\tilde{a}_o \simeq 0,155, 0,105$ y $0,075$. Se estudian tres valores de distancia entre edificios adyacentes ($D = \lambda/2, 3\lambda/4$ y $\lambda/4$). La dirección del movimiento producido por la onda incidente es siempre paralela o perpendicular a la dirección de alineación de las estructuras. Puede verse que la respuesta lateral de una estructura puede verse influenciada de forma significativa por la presencia de edificios cercanos, de modo que el valor pico de las fuerzas de corte en la base puede verse considerablemente amplificado a frecuencias cercanas a la frecuencia fundamental del sistema. La magnitud de la influencia de la interacción estructura-suelo-estructura varía entre una posición y otra, y también lo hace para distintas distancias entre edificios adyacentes o para distintas relaciones de aspecto. Incluso, hay casos en los que la magnitud de la respuesta crece respecto al caso de un solo edificio, y hay casos en los que dicha magnitud decrece, en función de la configuración. Pueden alcanzarse amplificaciones del orden del 50 %, pero parece que la construcción que ocupa la posición central es generalmente la que experimenta mayores desplazamientos. Nótese también que aunque problemas con distintos h/b e igual D no son dimensionalmente equivalentes, pueden observarse tendencias similares para problemas con idéntica D , si ésta está expresada en términos de λ .

Las siguientes dos figuras muestran resultados correspondientes a grupos de estructuras de idénticas características dinámicas, con una relación de aspecto $h/b = 4$, y sometidas a ondas tipo S incidiendo verticalmente, siendo $E_p/E_s = 100$ y $D = \lambda/2$ y $D = \lambda/4$. La fig. 6 muestra resultados para un grupo de nueve edificios, mientras que la fig. 7 corresponde al caso de cinco estructuras alineadas. Puede verse que, en general, la distancia $D = \lambda/2$ conlleva una respuesta más desfavorable que $D = \lambda/4$, resultando en amplificaciones del orden del 150 % y el 100 % para el edificio central, en los casos primero y segundo respectivamente.

A continuación se estudia la respuesta de los sistemas ante ondas de Rayleigh. Las figuras 8 y 9 presentan la respuesta dinámica de grupos de tres estructuras de idénticas características dinámicas, con $h/b = 2$ y $h/b = 4$, respectivamente, y para $D = \lambda/2$. Se muestran resultados correspondientes a rigideces relativas $E_p/E_s = 1000$ y 100 para ondas de Rayleigh incidiendo paralelamente o perpendicularmente a la dirección de alineación de las estructuras. La importante reducción de la deformación lateral experimentada por la última estructura en ser alcanzada por las ondas prueba la existencia de un importante

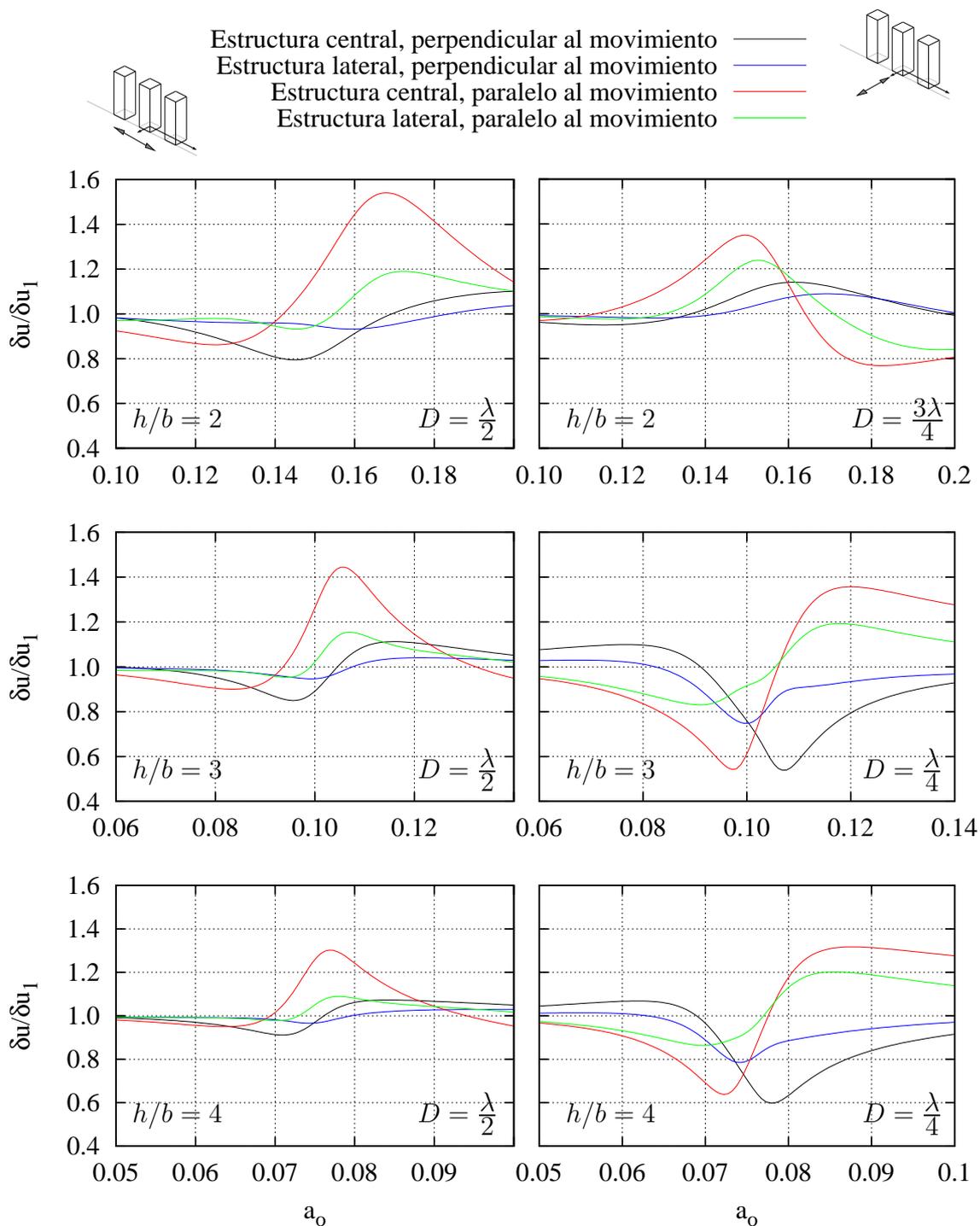


Figura 5: Factores de amplificación de la deformación lateral espectral debidos a la interacción entre tres estructuras de idénticas características dinámicas ante ondas S de incidencia vertical. $E_p/E_s = 1000$

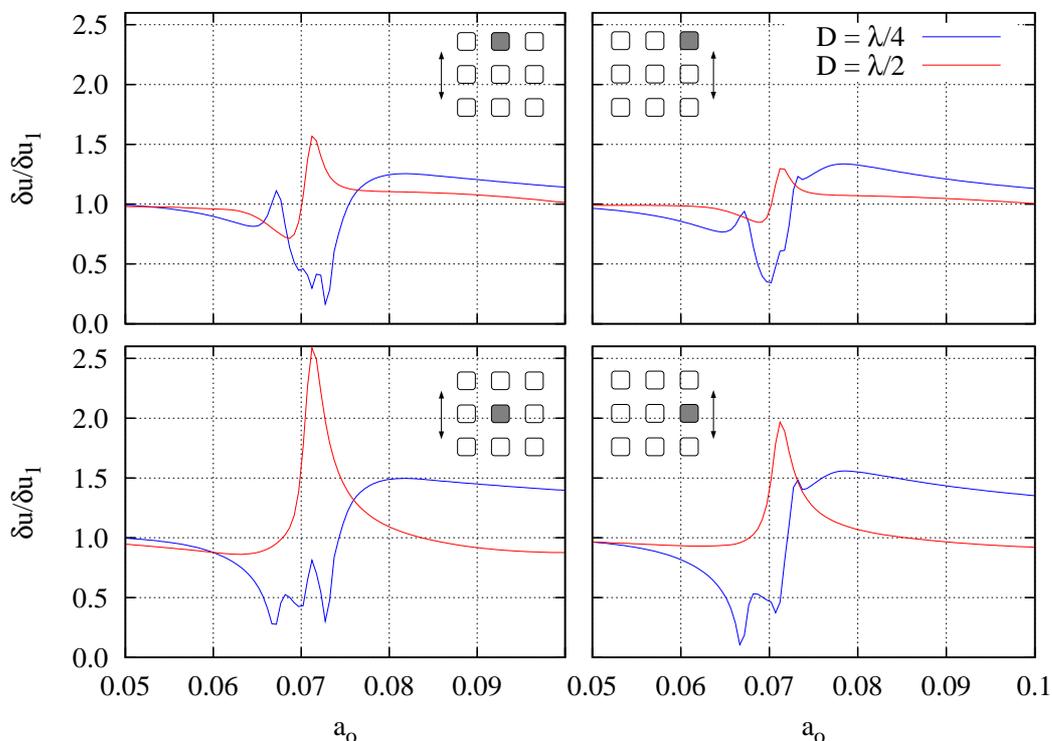


Figura 6: Factores de amplificación de la deformación lateral espectral debidos a la interacción entre nueve estructuras de idénticas características dinámicas ante ondas S de incidencia vertical. $h/b = 4$. $E_p/E_s = 100$.

efecto de apantallamiento producido por la presencia del resto de estructuras. Por otro lado, las máximas amplificaciones observadas no superan el 25% y son menores que las observadas en el caso de las ondas tipo S, siendo incluso más pequeñas a medida que aumenta la relación de aspecto de las estructuras.

3.3. Respuesta ante una señal sísmica

Después de obtener las funciones de transferencia correspondientes, pueden obtenerse resultados en el dominio del tiempo haciendo uso de la transformada rápida de Fourier (FFT). Se presentan determinados acelerogramas con el objetivo de evaluar la influencia de la interacción estructura-suelo-estructura en la respuesta sísmica de las estructuras. El sistema es sometido a la componente N-S del terremoto del Imperial Valley del 10 de Mayo de 1940, registrado en la subestación situada en el “Imperial Valley Irrigation District” de “El Centro”, en California. Las propiedades del suelo y los pilotes utilizadas en este ejemplo se muestran en el cuadro 1, siendo $h/b = 4$. Nótese que el periodo fundamental del sistema suelo-estructura es $\tilde{T} \simeq 0,40$ s.

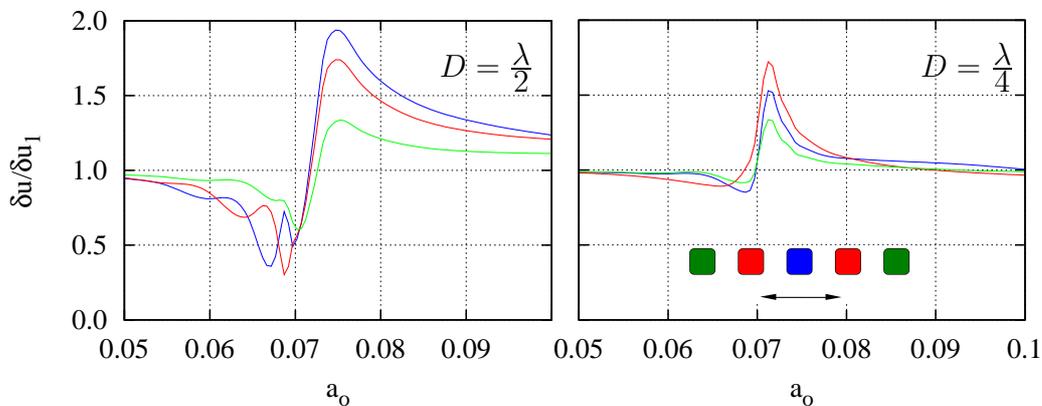


Figura 7: Factores de amplificación de la deformación lateral espectral debidos a la interacción entre cinco estructuras de idénticas características dinámicas ante ondas S de incidencia vertical. $h/b = 4$. $E_p/E_s = 100$.

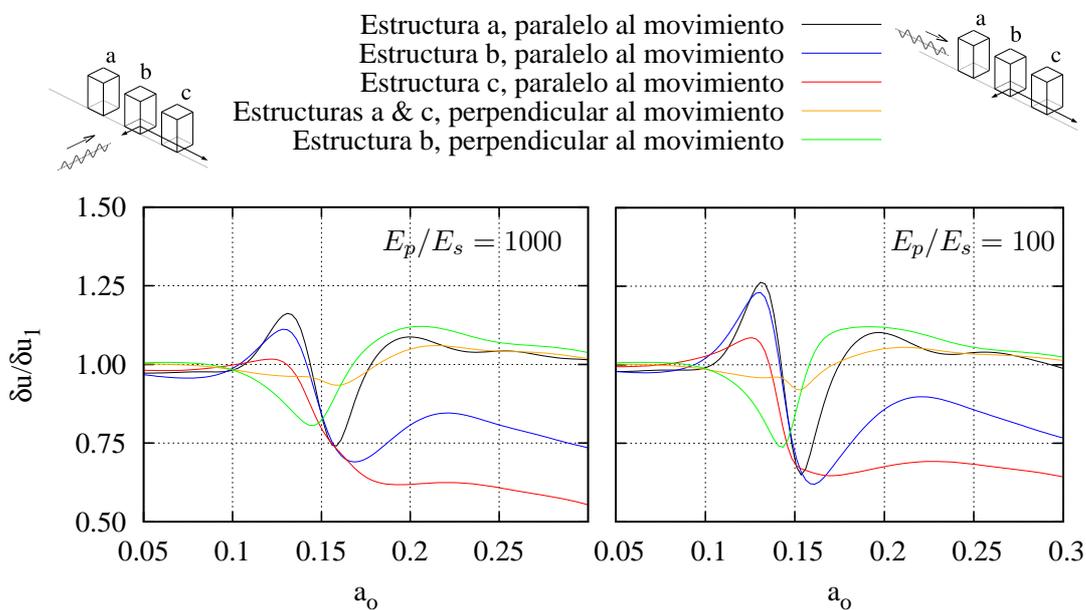


Figura 8: Factores de amplificación de la deformación lateral espectral debidos a la interacción entre tres estructuras de idénticas características dinámicas ante ondas de Rayleigh. $h/b = 2$. $D = \lambda/2$.

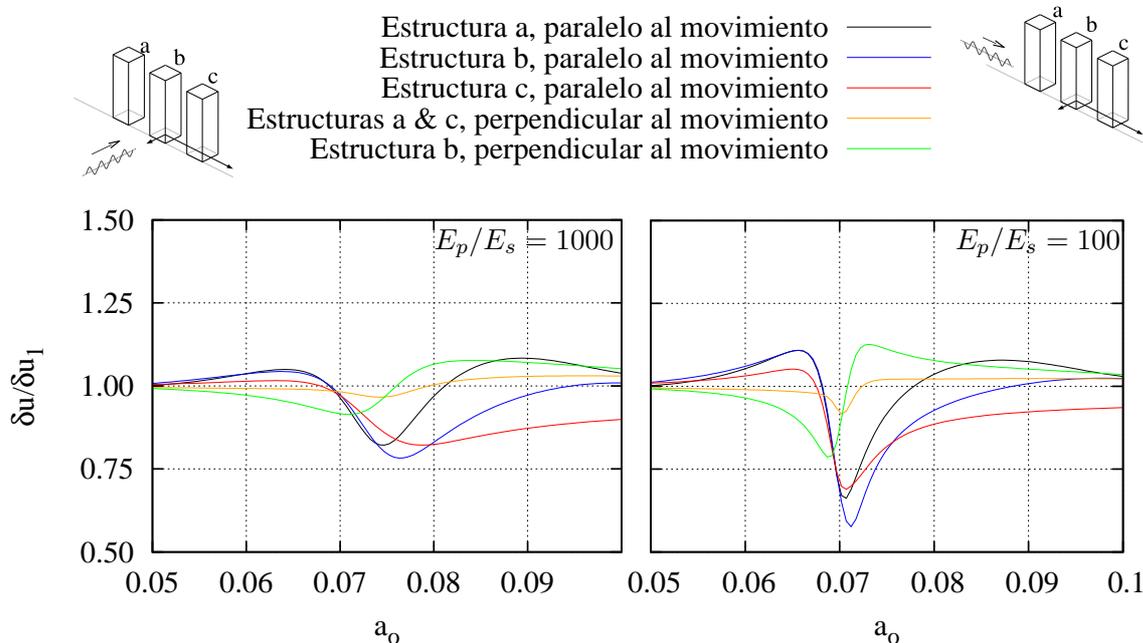


Figura 9: Factores de amplificación de la deformación lateral espectral debidos a la interacción entre tres estructuras de idénticas características dinámicas ante ondas de Rayleigh. $h/b = 4$. $D = \lambda/2$.

Las figuras 10 y 11 muestran acelerogramas correspondientes a la respuesta de grupos de tres y nueve edificios, respectivamente, dispuestos de la misma manera que los casos estudiados anteriormente, siendo $D = \lambda/4$. Por otro lado, las figuras 12 y 13 muestran los resultados correspondientes a $D = \lambda/2$. La respuesta es medida en la masa oscilante. En cada una de las figuras se representan los acelerogramas de campo libre y los de un solo edificio, además de las curvas correspondientes al edificio central y al edificio lateral o de esquina, en función del caso concreto.

Como era de esperar, la respuesta medida en el forjado es mucho mayor que la respuesta de campo libre, pudiendo medirse directamente sobre los gráficos la frecuencia natural

Suelo	Pilotes	Estructuras
$c_s = 239 \text{ m/s}$	$E_p = 2,76 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$	$T = 0,28 \text{ s}$
$\rho_s = 1750 \text{ kg/m}^3$	$\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$	$m = 7 \cdot 10^5 \text{ kg}$
$\nu_s = 0,4$	$d = 1 \text{ m}$	$h = 20 \text{ m}$
$\zeta_s = 0,05$	$L = 15 \text{ m}$	$\zeta = 0,05$

Cuadro 1: Propiedades correspondientes al suelo, los pilotes y las estructuras.

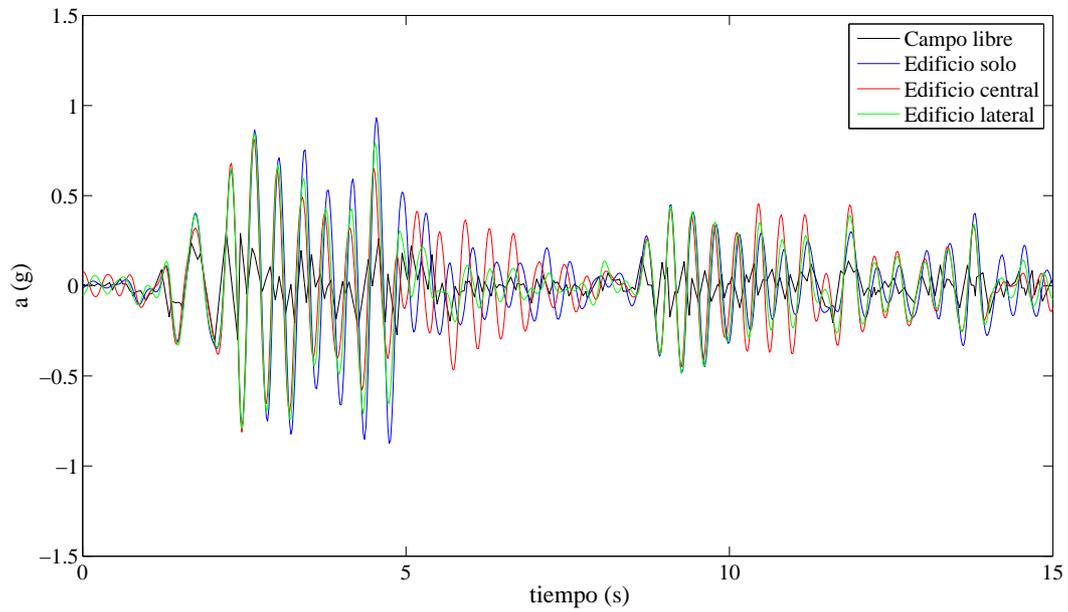


Figura 10: Acelerogramas. Configuración de tres edificios en línea con separación $D = \lambda/4$

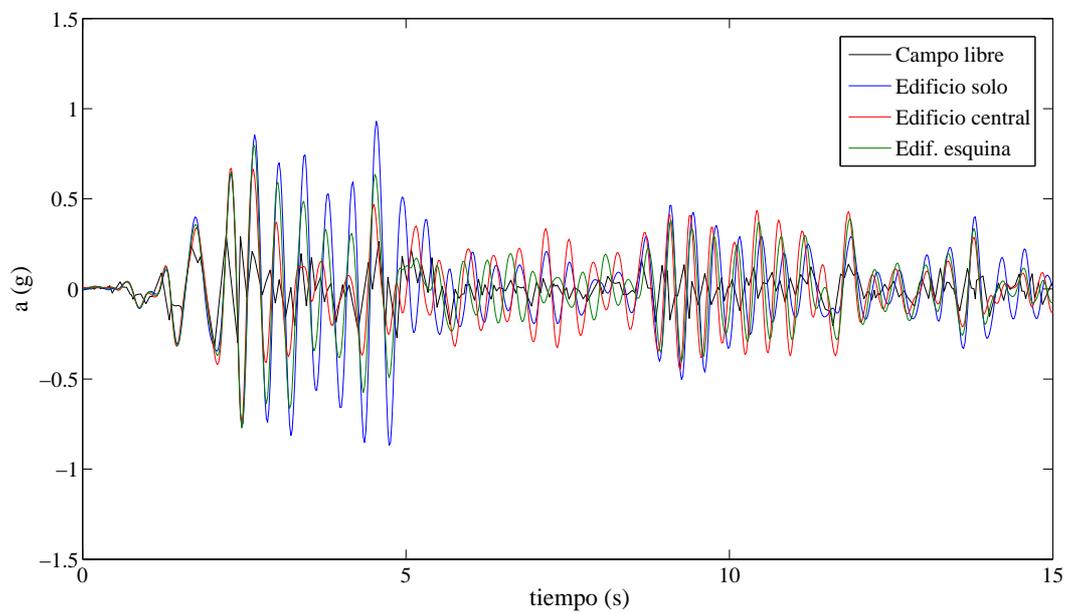


Figura 11: Acelerogramas. Configuración de nueve edificios con separación $D = \lambda/4$

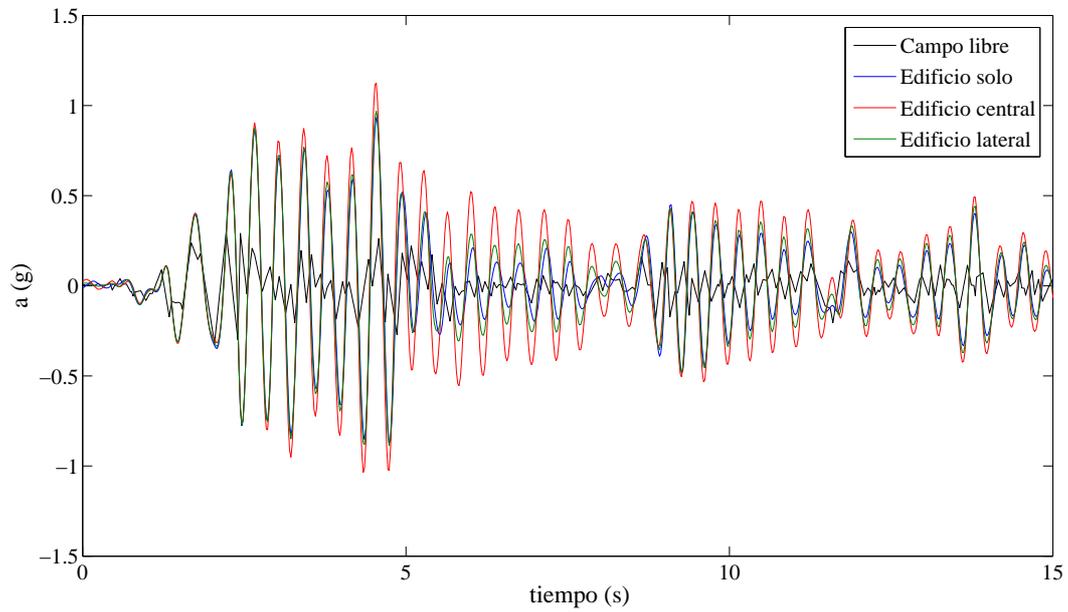


Figura 12: Acelerogramas. Configuración de tres edificios en línea con separación $D = \lambda/2$

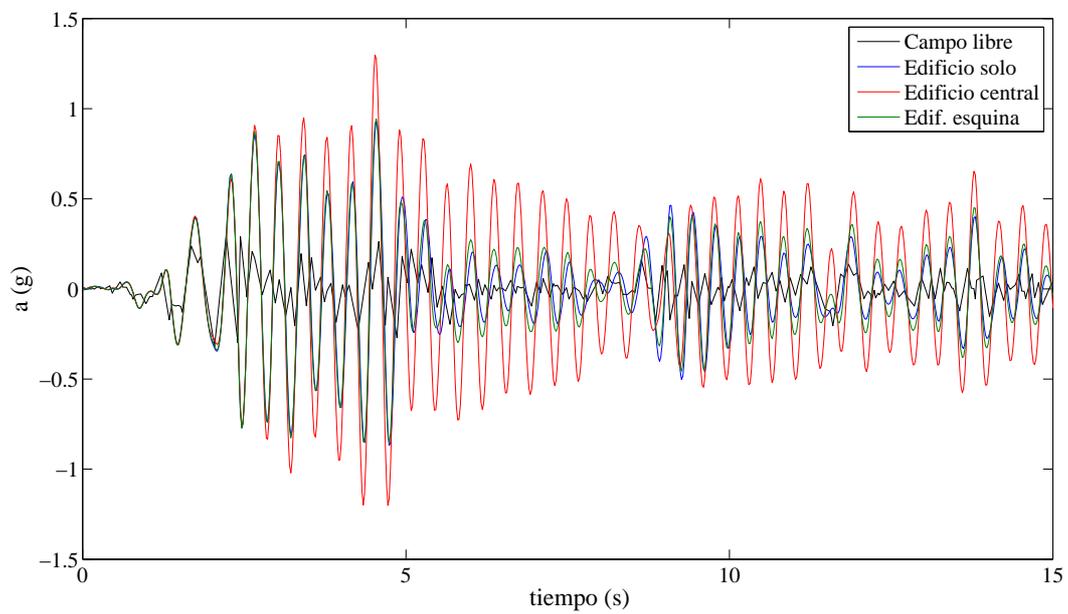


Figura 13: Acelerogramas. Configuración de nueve edificios con separación $D = \lambda/2$

del sistema suelo-estructura, en torno a los 0,40 s. Puede verse que, para $D = \lambda/4$, la respuesta del grupo de estructuras tiende a ser menor que la correspondiente al edificio simple. Por el contrario, para $D = \lambda/2$, la respuesta se ve significativamente amplificada, principalmente en el caso de las estructuras centrales. Puede verse también que la agrupaciones de nueve edificios ordenados en un cuadrado de 3×3 produce amplificaciones especialmente importantes, principalmente para el edificio central, dado que las amplificaciones sufridas por los edificios que ocupan las esquinas no son significativas.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- Un modelo numérico acoplado elementos de contorno – elementos finitos para el análisis dinámico de estructuras pilotadas ha sido utilizado para abordar el problema de la interacción, a través del suelo, entre edificios cercanos.
- El estudio ha sido realizado sobre un conjunto determinado de parámetros y configuraciones, y no constituye en análisis paramétrico exhaustivo del problema. Se han considerado estructuras a cortante de una sola altura, cimentados sobre un grupo de 3×3 pilotes en un suelo viscoelástico, con diferentes relaciones de aspecto y separaciones entre edificios adyacentes.
- Se ha encontrado que los efectos de interacción estructura-suelo-estructura tienen importancia en el caso de grupos de estructuras con características dinámicas similares, principalmente en cuanto a la respuesta estructural en el entorno de la frecuencia fundamental del sistema.
- Dependiendo de la distancia entre edificios adyacentes, la cual es expresada en función de la longitud de onda en el suelo $\lambda = c_s \tilde{T}$ a la frecuencia fundamental \tilde{T} del sistema suelo-estructura, la respuesta estructural de cada miembro del grupo puede verse tanto reducida como incrementada.
- Para ondas de corte de incidencia vertical, y para el conjunto de propiedades y configuraciones utilizado en este estudio, la distancia más desfavorable parece ser $D = \lambda/2$. Para este valor de la separación entre edificios adyacentes, se han observado grandes amplificaciones en la respuesta de los miembros de grupos de tres o cinco estructuras alineadas, e incluso mayores movimientos para el caso de un grupo cuadrado de nueve edificios. Las mayores amplificaciones ocurren en los elementos centrales cuando la onda incidente produce movimientos en la dirección de alineación de las estructuras.
- Se ha abordado también la incidencia de onda de Rayleigh. Cuando la dirección de propagación de éstas coincide con la dirección de alineación de las estructuras, el primero de los edificios en ser alcanzado es el que sufre los mayores desplazamientos, y los efectos de apantallamiento son claramente observables. Las amplificaciones debidas al efecto grupo son menores que las observadas para ondas tipo S.

- El análisis de la respuesta temporal de los grupos de edificios muestra que la magnitud de la respuesta sísmica puede verse significativamente amplificada, pero también puede verse reducida en función de la distancia entre estructuras cercanas, concepto que podría ser utilizado como medida reductora del riesgo sísmico a la hora de diseñar agrupamientos de estructuras.
- A la vista de estos resultados, y dado que se ha visto que la respuesta sísmica de una estructura puede verse significativamente amplificada por la presencia de estructuras cercanas, queda claro que es necesario estudiar los efectos de la interacción estructura-suelo-estructura y su influencia en el riesgo sísmico de las estructuras.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto de investigación BIA2007-67612-C02-01. Por otro lado, Luis A. Padrón es el beneficiario AP-2004-4858 del programa de becas FPU del Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecen este apoyo.

REFERENCIAS

- [1] R.A. Parmelee, Building–Foundation Interaction Effects. *J Eng Mech Div ASCE*, **93**(EM2), 131–152, 1967.
- [2] D.S. Perelman, R.A. Parmelee, S.L. Lee, Seismic Response of Single–Storey Interaction Systems. *J Struct Div ASCE*, **94**(ST11), 2597–2608, 1968.
- [3] R.A. Parmelee, D.S. Perelman, S.L. Lee, Seismic Response of Multiple–Storey Structures on Flexible Foundation. *Bul Seism Soc Ame*, **59**(3), 1061–1070, 1969.
- [4] M.A. Sarrazin, J.M. Roesset, R.V. Whitman. Dynamic Soil–Structure Interaction. *J Struct Div ASCE*, **98**(ST7), 1525–1544, 1972.
- [5] A.S. Veletsos, J.W. Meek. Dynamic behaviour of building–foundation systems. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **3**, 121–138, 1974.
- [6] J. Bielak. Dynamic Behavior of Structures with Embedded Foundations. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **3**, 259–274, 1975.
- [7] J.P. Wolf. *Dynamic soil–structure interaction*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [8] M.I. Todorovska, Effects of the depth of the embedment on the system response during building–soil interaction. *Soil Dyn Earthquake Eng* **11**, 111–123, 1992.

- [9] J. Avilés, L.E. Pérez-Rocha, Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth. *Soil Dyn Earthquake Eng*, **15**, 11–27, 1996.
- [10] J. Avilés, L.E. Pérez-Rocha, Effects of foundation embedment during building–soil interaction. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **27**, 1523–1540, 1998.
- [11] J.S. Mulliken, D.L. Karabalis, Discrete model for dynamic through–the–soil coupling of 3-D foundations and structures. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **27**, 687–710, 1998.
- [12] J. Avilés, M. Suárez, Effective periods and dampings of building–foundation systems including seismic wave effects. *Eng Struct*, **24**, 553–562, 2002.
- [13] T.H. Lee, D.A. Wesley, Soil–structure interaction of nuclear reactor structures considering through–soil coupling between adjacent structures. *Nuclear Eng Design*, **24**, 374–387, 1972.
- [14] J.E. Luco, L. Contesse, Dynamic structure–soil–structure interaction. *Bul Seism Soc Ame*, **63**, 1289–1303, 1973.
- [15] H.L. Wong, M.D. Trifunac, Two-dimensional, antiplane, building–soil–building interaction for two or more buildings and for incident plane SH waves. *Bul Seism Soc Ame*, **65**(6), 1863–1885, 1975.
- [16] S. Wang, G. Schmid, Dynamic structure–soil–structure interaction by FEM and BEM. *Comput Mech*, **9**, 347–357, 1992.
- [17] L. Lehmann, H. Antes, Dynamic structure–soil–structure interaction applying the Symmetric Galerkin Boundary Method (SGBEM). *Mechanics Research Communications*, **3**, 297–304, 2001.
- [18] D. Clouteau, D. Aubry, Modifications of the ground motion in dense urban areas. *J Comput Acoustics*, **9**, 1659–1675, 2001.
- [19] C. Tsogka, A. Wirgin. Simulation of seismic response in an idealized city. *Soil Dyn Earthquake Eng*, **23**, 391–402, 2003.
- [20] M. Kham, J.F. Semblat, P.Y. Bard, P. Dangla. Seismic site–city interaction: main governing phenomena through simplified numerical models. *Bul Seism Soc Ame*, **96**(5), 1934–1951, 2006.
- [21] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, O. Maeso, BEM-FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups. *Eng Anal Bound Elem*, **31**, 473–484, 2007.
- [22] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, O. Maeso, Dynamic analysis of piled foundations in stratified soils by a BEM-FEM model. *Soil Dyn Earthquake Eng*, **28**, 333–346, 2008.