

# Análisis sísmico de estructuras pilotadas sobre suelos viscoelásticos y poroelásticos mediante un modelo acoplado BEM/FEM.

Miguel A. Millán, José Domínguez

*Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, sn, 41092- Sevilla, España. mangelmm@us.es ,jose@us.es*

## Resumen

El análisis sísmico de estructuras pilotadas debe de representar de forma rigurosa el comportamiento dinámico de los pilotes, en especial para grandes estructuras en las que pueden tener relevancia los fenómenos de variabilidad espacial de la excitación, interacción entre distintas cimentaciones o efectos locales debidos a la topografía y geología. Se presenta un modelo numérico 3D, en el que se acoplan elementos de contorno y elementos finitos tipo barra, que permite modelar de una forma completa la estructura y la cimentación por pilotaje, incluyendo el suelo como un medio viscoelástico o poroelástico. La excitación sísmica se modela como una onda incidente, de tipo SH, con diferentes ángulos de incidencia respecto a la estructura. De esta forma se tienen en cuenta todos los efectos mencionados.

**Palabras Clave:** Interacción dinámica suelo-estructura, pilotes, suelo poroelástico.

**Abstract (TNR 10 ptos, negrita, acortando márgenes 10 mm a izqda. y dcha.)**

Seismic analysis of structures founded on piles should properly represent dynamic behavior of piles, particularly for large structures where spatial variability of seismic excitation, interaction between foundation and local effects can take place. A 3D coupled BEM-FEM numerical model is presented coupling beam-type finite elements with boundary elements. It allows to represent the fully soil-pile-structure system. The soil is modeled as a viscoelastic or poroelastic medium. The seismic excitation is represented as a SH-type incident wave incoming with several incidence angles. All mentioned effects are considered.

**Keywords:** soil-structure interaction, piles, poroelastic soil.

## 1. Introducción

El análisis sísmico de estructuras pilotadas ha sido objeto de un estudio intenso en los últimos años. Dada la dificultad de analizar de una forma integral y directa una estructura pilotada, estos análisis se han centrado en el cálculo de las rigideces dinámicas de grupos de pilotes y en las funciones de transferencia del movimiento sísmico en los mismos.

De esta forma el análisis dinámico y sísmico se realiza para la estructura sustituyendo los grupos de pilotes por unos muelles equivalentes (generalmente de rigidez constante),

y el movimiento sísmico de excitación por aquél que se obtiene en la base de la estructura a través de las mencionadas funciones de transferencia.

Estos métodos tienen algunas limitaciones y simplificaciones que no permiten obtener una adecuada respuesta de la estructura para casos en los que influya significativamente la variabilidad espacial de la excitación sísmica, en que sea determinante la interacción entre distintas cimentaciones, frecuencias de vibración moderadas, etc.

Se presenta un modelo numérico 3D, en el que se acoplan elementos de contorno y elementos finitos tipo barra, que permite modelar de una forma completa la estructura, incluyendo la cimentación por pilotaje. De esta forma es posible considerar todos los aspectos mencionados previamente que otras metodologías no pueden analizar.

El análisis se centra en la aplicación del modelo a grupos de pilotes sobre suelos viscoelásticos y poroelásticos, estudiando su respuesta sísmica cuando se consideran aisladamente, y su interacción cuando las cimentaciones son contiguas.

Se valida el modelo con resultados publicados para pilotes aislados y grupos de pilotes en suelos viscoelásticos. No existen en la bibliografía resultados de funciones de transferencia de pilotes en suelos poroelásticos, que son presentadas en este trabajo.

Se analiza la interacción entre grupos de pilotes y se obtienen resultados para ambos tipos de suelos. Para este caso tampoco existen referencias bibliográficas previas.

### 3. Modelo acoplado BEM - FEM para el estudio de pilotes.

#### 3.1. Modelo de estructura y pilotes con elementos finitos tipo barra.

Se han empleado elementos barra en 3 dimensiones, con masa distribuida y posibilidad de amortiguamiento proporcional dependiente de la matriz de rigidez y de la matriz de masas. Se permite cualquier posibilidad de unión entre barras, tipo de vínculos y tipología de cargas.

La formulación se ha hecho en el dominio de la frecuencia. El conjunto de ecuaciones obtenido puede representarse como:

$$\begin{pmatrix} S_{ss} & S_{sp} \\ S_{bs} & S_{bp} \\ S_{ps} & S_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s^t \\ u_b^t \\ u_p^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_s \\ P_b \\ P_p \end{pmatrix}$$

donde S es la matriz de rigidez, u son los desplazamientos de los nodos y P las fuerzas en los mismos. El subíndice b se refiere a los nodos del puente conectados al encepado, p a los nodos de los pilotes y s al resto de nodos de la estructura. El superíndice t indica que los desplazamientos son totales, no relativos.

Reordenando el sistema y usando la relación entre fuerzas en los nodos MEF y las tensiones en los nodos MEC (matriz MFpilot), y estableciendo el acoplamiento de movimientos en el encepado (matriz D) respecto al nodo de referencia (subíndice re!) se puede obtener:

$$\begin{pmatrix} S_{ss} & S_{sb} \cdot D & S_{sp} & 0 & 0 \\ D^T \cdot S_{bs} & D^T \cdot S_{bb} \cdot D & D^T \cdot S_{bp} & D^T \cdot MFpilot_h & 0 \\ S_{bp} & S_{pb} \cdot D & S_{pp} & 0 & D^T \cdot MFpilot_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s^t \\ u_{,ef}^t \\ u_p^t \\ t_{,ef} \\ t_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_s \\ P_{b0} \\ P_{b0} \end{pmatrix}$$

#### 2.2. Modelo de suelo con elementos de contorno tridimensionales.

Se han empleado elementos de contorno 3-D cuadráticos, rectangulares o triangulares, pudiéndose reproducir cualquier geometría, recta o curva.

La formulación se ha hecho en el dominio de la frecuencia. El conjunto de ecuaciones obtenido a partir del MEC puede representarse como:

$$\begin{pmatrix} H_{cp} & H_{gp} \\ H_{gp} & H_{gp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{cp} \\ u_{gp} \\ u_{gp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{cp} & G_{gp} \\ G_{gp} & G_{gp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{cp} \\ t_{gp} \\ t_{gp} \end{pmatrix}$$

donde u y t representan movimientos y tracciones en los nodos respectivamente y H y G son las matrices obtenidas por integración sobre el elemento. El subíndice cp y gp se refiere a los nodos de pilotes y del suelo que coinciden en la cabeza del pilote y conectan con el puente, p se refiere a los nodos del cuerpo de los pilotes y g al resto de nodos del suelo.

2.3. Montaje del sistema completo.

Usando las expresiones anteriores, los sistemas de ecuaciones y montando en un solo sistema y reordenando:

$$\begin{pmatrix} sss & Ssb \cdot D & s_{pb} & 0 & 0 & 0 \\ DT \cdot sbs & Dr \cdot Sbb \cdot D & D^r \cdot s_{bp} & 0 & D^7 \cdot MFpilot_b & 0 \\ s_{bp} & S_p \cdot b \cdot D & s_{pp} & 0 & 0 & D^7 \cdot MFpilot_p \\ 0 & (H_{cp} + H_{gp}) \cdot D & H_p & H_g & -G_{cp} & -G_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s^i \\ u_{,ef}^i \\ u_p^i \\ u_g^i \\ l_{ref} \\ t_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P \\ DT \cdot t_0 \\ P_{b0} \\ Ge \cdot te \\ G_{gp} \cdot t_{gp} \end{pmatrix}$$

4. Estudios numéricos.

4.1.- Funciones de transferencia de pilotes y grupos de pilotes en suelo viscoelástico. Validación del modelo.

Con la intención de validar el modelo desarrollado, se han calculado las respuestas dinámicas de un pilote aislado y de un grupo de 2x2 pilotes sobre un semiespacio viscoelástico ante ondas tipo SH. La discretización usada puede verse en la fig. 1.

Las respuestas presentadas corresponden a los parámetros siguientes:

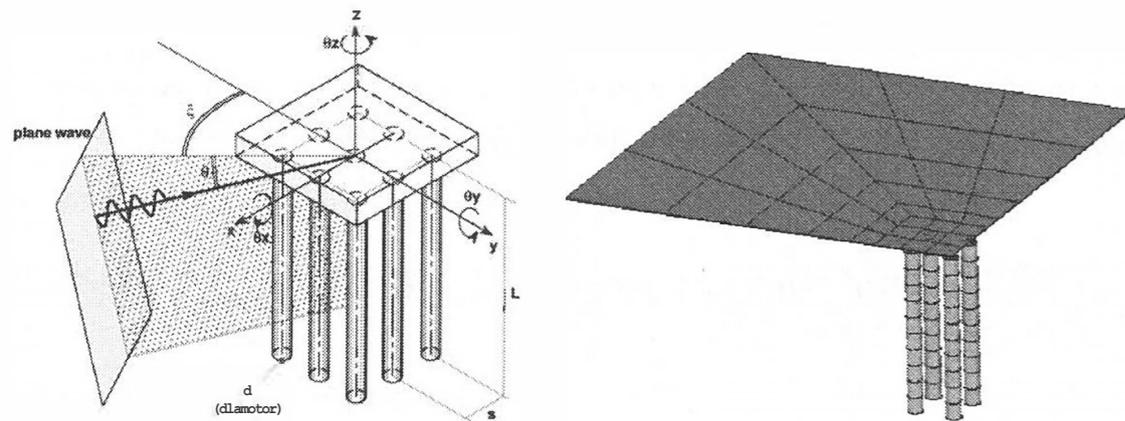


Figura 1. Esquema de onda incidente sobre un grupo de pilotes y modelo con doble simetría para un grupo de 3x3 pilotes.

Los desplazamientos obtenidos se han normalizado con respecto al movimiento en campo libre del suelo  $U_{x0}$ , Los giros se multiplican por el diámetro del pilote y también se normalizan respecto  $u_{x0}$ , Ambos se representan respecto a la frecuencia normalizada  $\omega = \omega \cdot d/c_s$ . La velocidad de la onda de corte es  $C_s = (Gs/\rho_s)^{1/2}$ .

Los resultados se muestran en las fig. 2 y 3 para el pilote aislado y para el grupo de pilotes. Puede verse un excelente acuerdo con los resultados de Kaynia y Novak [1].

4.1.- Funciones de transferencia de pilotes y grupos de pilotes en suelo poroelástico.

Para el caso de pilotes sobre un semiespacio poroelástico, se han considerado solamente ondas SH de incidencia vertical.

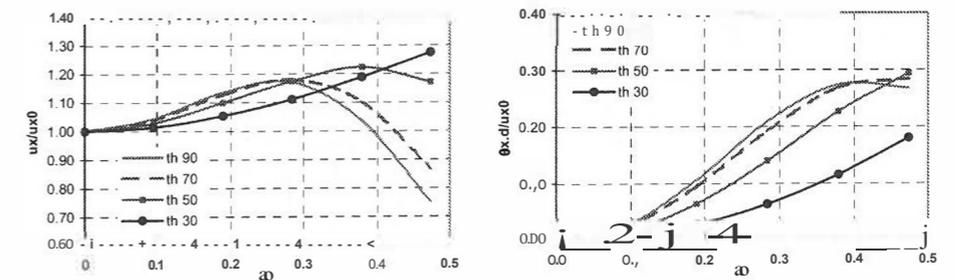


Figura 2. Función de transferencia para desplazamiento horizontal y giro de horizontal. Pilote aislado ante onda SH con diferentes ángulo de incidencia respecto a la horizontal.

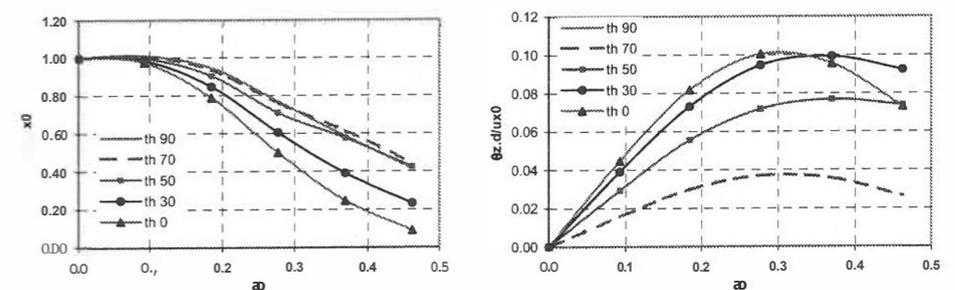


Figura 3. Función de transferencia para desplazamiento horizontal y giro de horizontal. Grupo de 3x3 pilotes ante onda SH con diferentes ángulo de incidencia respecto a la horizontal.

Las propiedades del suelo consideradas son  $G = 3.2175e7 \text{ N/m}^2$ ,  $\nu_s = 0.25$ ,  $\rho_s = 1425 \text{ kg/m}^3$ ,  $p_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $P_a = 0$ ,  $\phi = 0.35$ ,  $b$  (cte. disipación) = variable  $3.0e7 - 0 \text{ N/m}^2$ ,

$p_p/p_s = 3/2$ ,  $Y_p = 0.25$ ,  $Y_s = 0.25$ ,  $\beta_p = 0$ ,  $\beta_s = 0.05$ ,  $E_p/E_s = 1000$  y  $L/d = 20$ , siendo L la longitud y d el diámetro del pilote. La separación entre los pilotes del grupo es de  $s = 5d$ .

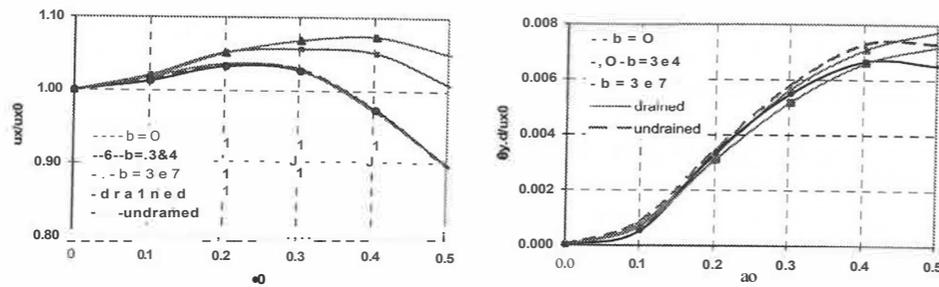


Figura 4. Función de transferencia para desplazamiento horizontal y giro con eje horizontal. Grupo de 3x3 pilotes ante onda SH vertical. Suelo poroelástico con diferentes constantes de disipación.

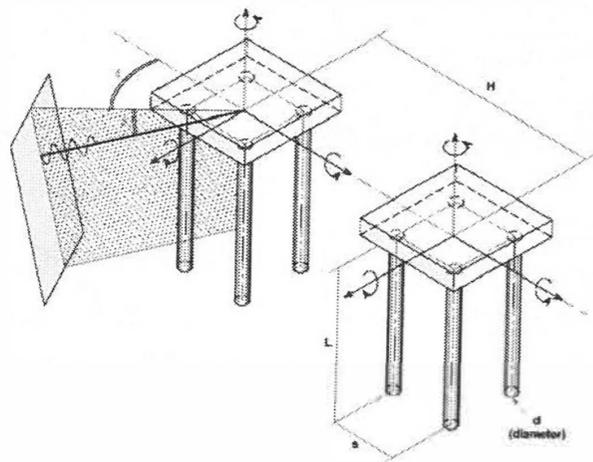


Figura 5. Esquema de onda incidente sobre dos grupos de pilotes ( $d=6m$ ,  $s=2m$ ,  $H=2,4$  y  $6m$ ).

$Q=4.61e8 \text{ N/m}^2$ ,  $R=2.4823e8 \text{ N/m}^2$  y para los pilotes  $P_i P_{\text{suelo+agua}}=1.94$ ,  $v_p=0.20$ ,  $p_p=0$ ,  $B_s=0.05$ ,  $E_p/E_s=343$  y  $Lid=20$ . En todos los casos se ha supuesto contacto impermeable entre suelo y pilote.

El resultado para un grupo de 3x3 pilotes se incluye en la fig. 4.

#### 4.1.- Funciones de transferencia de grupos de pilotes contiguos considerando la interacción entre los mismos. Suelo viscoelástico y poroelástico.

Con propiedades análogas a las indicadas anteriormente, se ha analizado la respuesta de dos grupos de pilotes contiguos ante ondas SH, para diferentes separaciones entre los mismos (2m, 4m y 6m). En la fig. 5 se incluyen algunos resultados comparándolos con la respuesta del grupo de pilotes aislado.

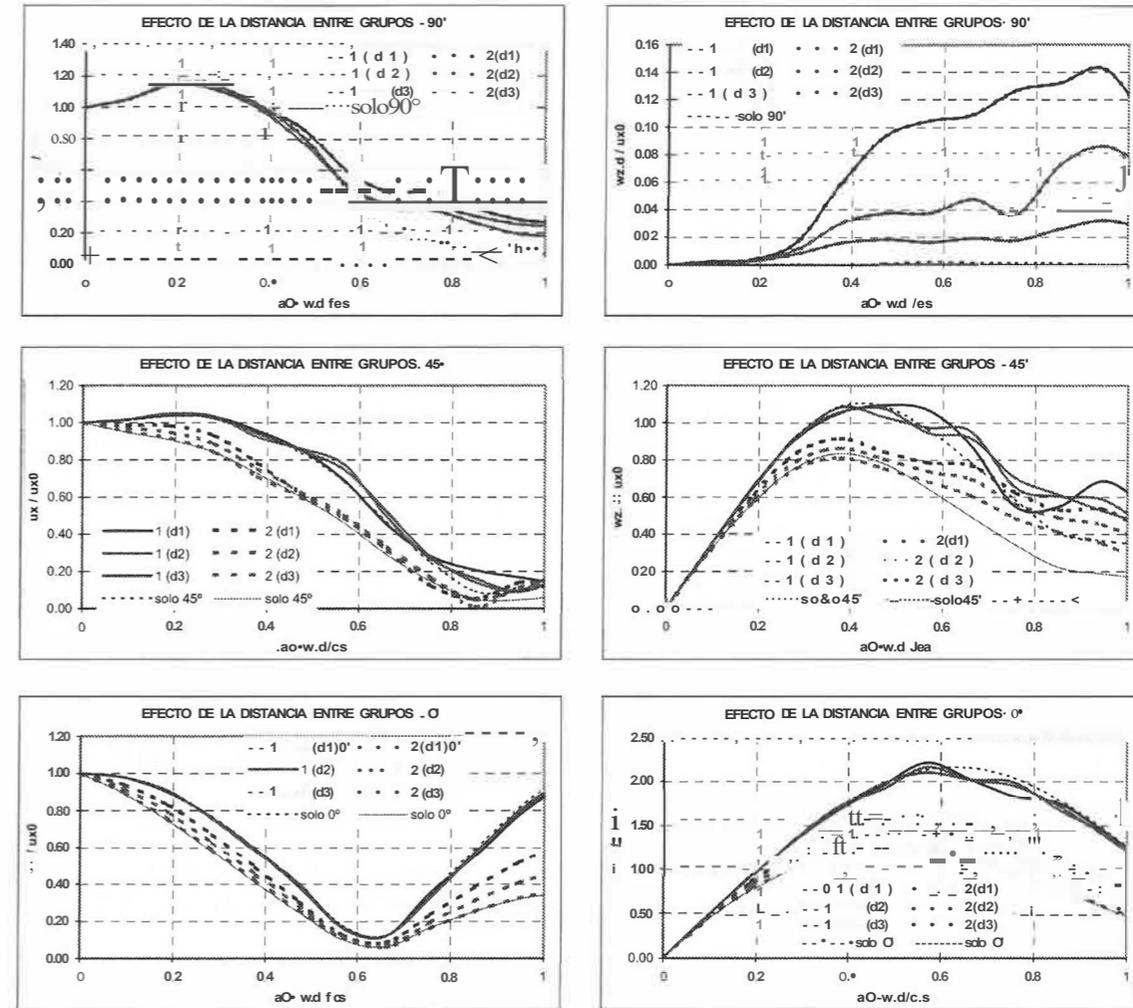


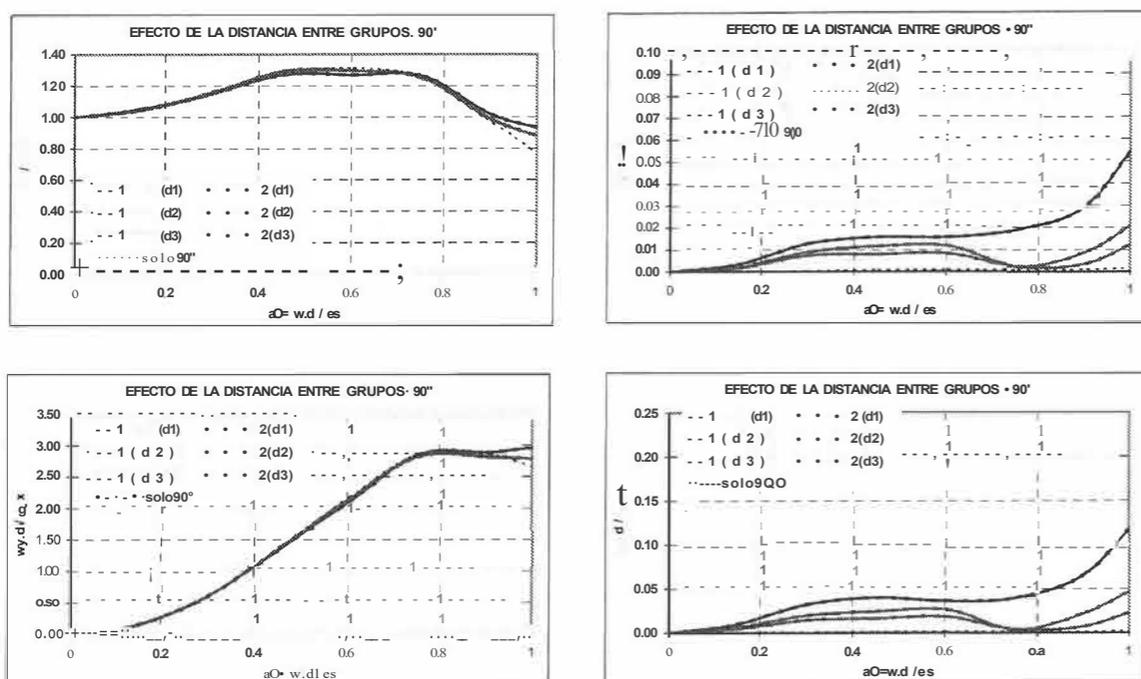
Figura 5. Función de transferencia para el movimiento horizontal y el giro de torsión de dos grupos de pilotes cercanos. Onda SH con distintos ángulos de incidencia ( $90^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $0^\circ$ ). Distancias entre centros de encepados:  $d_1=2m$ ,  $d_2=4m$  y  $d_3=6m$ .

Como puede verse en los mismos, no es muy significativa la interacción salvo a frecuencias altas para el desplazamiento horizontal y el giro de torsión. Además el desplazamiento vertical, que para un grupo aislado es nulo, es distinto de cero.

#### 4.2.- Análisis de una gran estructura pilotada.

Se ha considerado un puente recto tipo viaducto, con cuatro vanos de  $28+40+40+28 \text{ m}$ ., con tres pilas centrales de 8 m. de altura y dos estribos con los correspondientes terraplenes de acceso. Todas las cimentaciones se han considerado pilotadas con grupos de 9 pilotes de 80cm y 16 m. de profundidad. Las pilas y estribos están empotradas en los encepados y articuladas con el tablero (apoyo de neopreno). El tablero es continuo

sin juntas. El suelo se ha representado como un semiespacio viscoelástico. Se ha considerado un suelo arenoso con  $G = 37 \cdot 10^6$  Pa,  $\rho = 2000$  Kg/m<sup>3</sup> y  $\nu = 0,33$ .



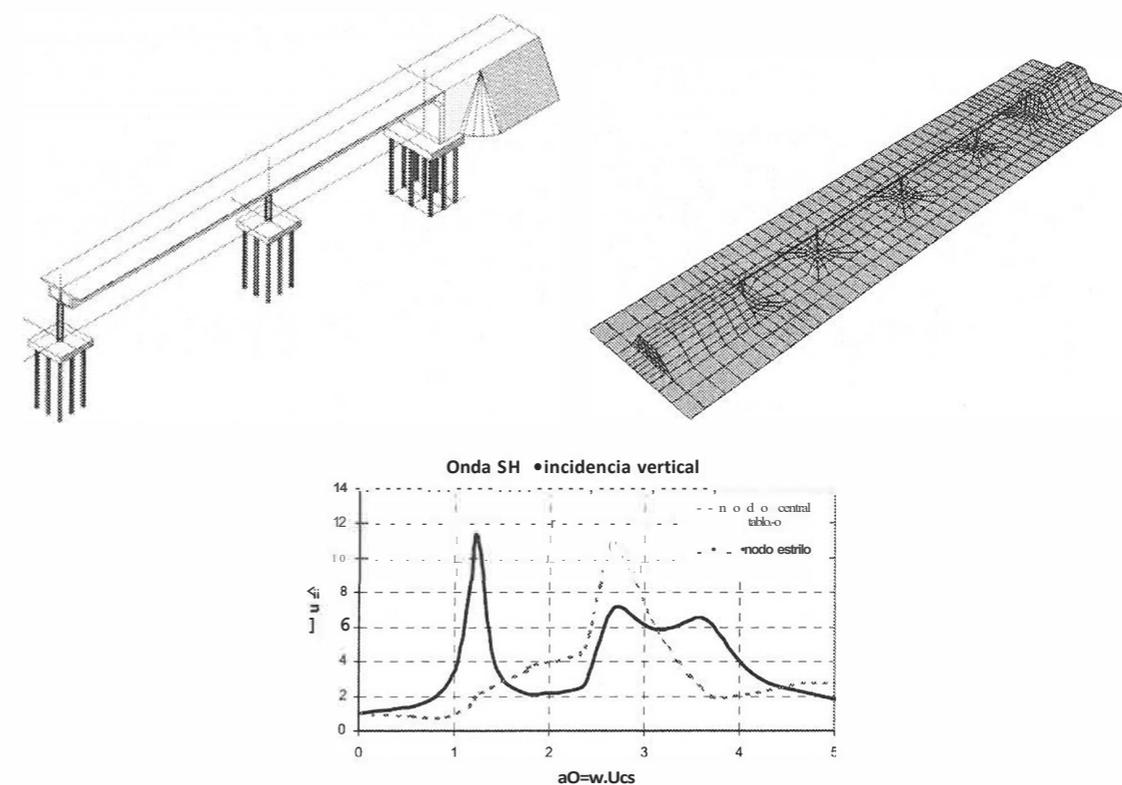
**Figura 6** Función de transferencia para el movimientos horizontal y vertical y para los giros horizontal y de torsión de dos grupos de pilotes cercanos. Onda SH vertical. Suelo poroelástico.

Se ha tenido en cuenta un amortiguamiento histerético de un 5% tanto en la estructura como en el suelo. La velocidad de onda transversal para este suelo es de 136 m/seg.

Para este modelo se ha estudiado la respuesta del puente para ondas sísmicas tipo SH verticales con movimiento transversal al puente. Los resultados se muestran en la fig. 7.

## 5.- Conclusiones.

El modelo propuesto permite el análisis dinámico y sísmico de estructuras pilotadas, considerando de forma completa y rigurosa todos los elementos de la misma y la interacción que existe entre ellos. El análisis se centra en la aplicación del modelo a grupos de pilotes sobre suelos viscoelásticos y poroelásticos, estudiando su respuesta sísmica cuando se consideran aisladamente, y la interacción mutua cuando las cimentaciones son contiguas.



**Figura 7.** Esquema del puente y modelo 3D del mismo, incluyendo estribos y terraplenes de acceso. Resultados para onda SH vertical

## 6. Referencias.

1. Kaynia A.Mand Novak, M. *Response of Pile Foundations to Rayleigh waves and obliquely incident body waves*, Earthquake eng. struct. dyn., Vol. 21, pp. 303-318. (1992).
2. Maeso, O. Aznarez, J.A. and García, F. *Dynamic Impedances of Piles and Groups of Piles on Saturated Soils*, Computers and Structures, (In press)(2004).
3. Coda H.B., Venturini W.S. and Aliabadi, F. *A General 3D BEM/FEM Coupling Applied to Elastodynamic Continua/Frame Structures Interaction Analysis*, Int. J. Numer. Methods in Engrg., Vol. 46, pp. 695-712.(1999)

## 7. Agradecimientos

A la Dirección General de Investigación del Ministerio de Ciencia y Tecnología por el proyecto DPI 2001-2377-C02-01.