

METODOLOGIA DE ANALISIS SISMICO DEL SISTEMA SUELO-PILOTE-ESTRUCTURA

Pedro Ortigosa (1), Raúl Campos (2) y Tomás Guendelman (3)

**(1) IDIEM, U. de Chile
(2) Consultor Privado
(3) IEC Ingeniería S.A.**

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una metodología para evaluar la respuesta sísmica del sistema suelo-pilote-estructura, la cual se subdivide en dos etapas. En primer lugar se evalúa la respuesta sísmica del depósito de suelo. En la segunda etapa, se transfiere la respuesta sísmica de campo libre del suelo al contacto suelo-pilote representado por resortes y amortiguadores de interacción dinámica. Los análisis indican que bajo ciertas condiciones, los resultados obtenidos por métodos tradicionales de análisis, pueden alejarse en forma importante de la realidad (inseguros).

SUMMARY

The present work develops a methodology to evaluate the seismic response of the system soil-pile-structure, which is subdivided in two steps. In the first one, the seismic response of the soil deposit is evaluated. In the second step, the seismic response of the free-field is transferred to the interface soil-pile represented by a spring and damper of dynamic interaction. The analyses indicate that for certain conditions, the results obtained by traditional methods could be very far from reality (insecure).

INTRODUCCION

Los métodos de análisis que tradicionalmente se utilizan para estudiar el comportamiento de estructuras con fundaciones piloteadas, tales como el método del coeficiente sísmico o el análisis modal espectral, desprecian importantes efectos presentes en el comportamiento sísmico de tales estructuras, tales como: transmisión de cargas a través del contacto suelo-pilote, interacción dinámica suelo-pilote, interacción cinemática entre la superestructura y los pilotes, contenido de frecuencia de los sismos, comportamiento no lineal del suelo y separación suelo-pilote (gapping).

Durante los últimos 35 años se han realizado importantes esfuerzos orientados a evaluar en forma racional la respuesta sísmica, incorporando en forma integral al suelo, a la fundación piloteada y a la estructura. Los trabajos más importantes desarrollados corresponden a los de Penzien (Ref.1), Matlock (Ref.2), Gazetas et al. (Ref.3). Además, durante los últimos 15 años, ha sido posible acceder a mediciones de terreno y laboratorio que han permitido contrastar los resultados con métodos tradicionales de análisis, así como aquellos de interacción suelo-pilote-estructura. Ejemplo de estas mediciones son las reportadas por Ohira et al. (Ref.4) sobre el puente Ohaba-

Ohashi en Japón, y por Boulanger et. al. (Ref.5) en pruebas de laboratorio en la Universidad de California at Davis.

El presente trabajo desarrolla una metodología de análisis del sistema suelo-pilote-estructura para un pilote individual, que permite incorporar los siguientes efectos: transmisión de cargas a través del contacto suelo-pilote, interacción dinámica suelo-pilote, comportamiento no lineal del suelo, interacción cinemática entre el pilote y la estructura soportada, contenido de frecuencia de los registros sísmicos, efectos que en general son despreciados por métodos tradicionales de análisis. Por el contrario, no se han considerado en el modelo los fenómenos de gapping y licuefacción de suelos (arenas saturadas).

DESARROLLO METODOLOGIA PROPUESTA

El método propuesto consta de dos etapas. En la primera, se determina la respuesta de campo libre del depósito de suelo, en ausencia del sistema pilote-estructura, para lo que se utiliza el programa SHAKE91 (Ref.6), lo cual se muestra en la figura 1a. El movimiento sísmico utilizado corresponde al registro en roca superficial de la estación Quintay asociado al sismo del 3 de Marzo de 1985 en Chile. Como resultado de los análisis, se obtiene la degradación del módulo de corte dinámico del suelo, variable de acuerdo al nivel de deformación por corte de cada sub-capa, así como los registros de aceleración asociados también a cada sub-capa.

En la segunda etapa, se determina la respuesta sísmica del sistema pilote-estructura, para lo cual se utiliza un modelo tipo Penzien (Ref.1), representando al pilote y superestructura mediante masas concentradas unidas por elementos barra (figura 1b). El análisis se lleva a cabo mediante el programa ASPEN (Ref.7). Como movimiento de excitación del modelo se utiliza los registros sísmicos de aceleración de campo libre determinados en la etapa 1, los cuales son aplicados a nivel del contacto suelo-pilote, representado mediante resortes y amortiguadores en paralelo.

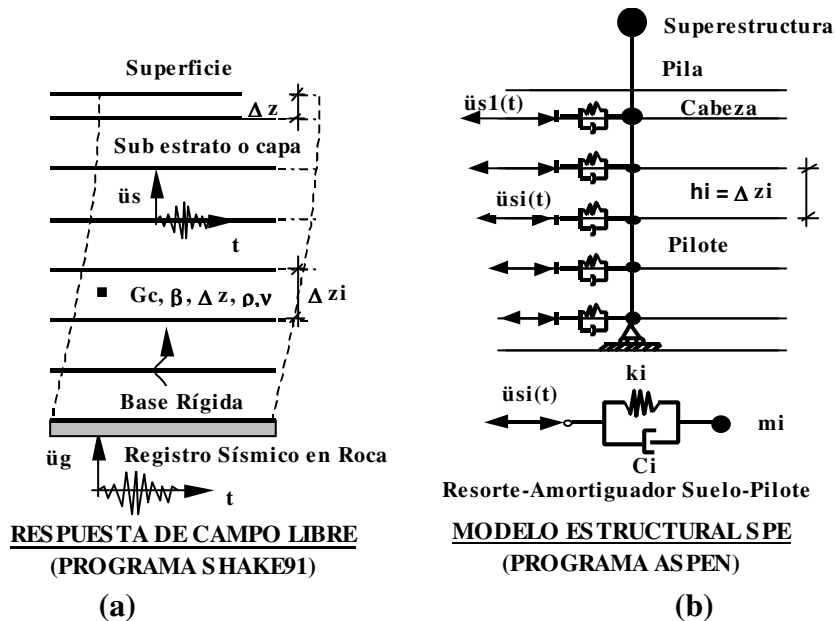


Figura 1: Modelo sistema SPE: (a) Respuesta de campo libre del suelo; (b) Análisis dinámico del sistema pilote-estructura.

REPUESTA DE CAMPO LIBRE

Una vez definida la sismicidad de la región en la cual se ubica la estructura en estudio, lo que permite definir el registro sísmico de diseño (real o artificial), la respuesta del depósito de suelo puede ser determinada mediante diversas técnicas tales como: viga de corte (SHAKE91-2D), diferencias finitas (FLAC-3D) y elementos finitos (SAFDINA-2D). Para el presente estudio se ha utilizado el programa SHAKE91 (Ref.6), de amplio uso en ingeniería geotécnica, el cual utiliza un método lineal equivalente para incorporar la respuesta no lineal del suelo, reflejado en la degradación del módulo de corte dinámico debido a la deformación de corte del suelo.

Para el presente trabajo se consideraron dos tipos de depósitos de suelo habituales en Chile: depósito de grava (Santiago) de 85.5 m de espesor, y depósito de arcilla de 30 m de espesor, representando suelos de alta y baja rigidez respectivamente.

INTERACCION SUELO-PILOTE

Para definir la interface suelo-pilote se utiliza un resorte y amortiguador en paralelos (figura 1b), los cuales representan la rigidez y amortiguamiento de interacción dinámica, respectivamente.

Para definir la rigidez de interacción, K , se ha utilizado la formulación de la teoría de la elasticidad, incorporando la degradación del módulo de corte obtenida del análisis de la respuesta de campo libre, derivando la siguiente expresión:

$$K_i = 1.515 * \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu^2)} * G_{maxi} * (G_o / G_{max})_i * Dz_i \quad (1)$$

- K_i : Coeficiente del resorte asociado a la sub-capa i del estrato de suelo. Posee unidades de (T/m) si G_{max} se mide en (T/m²) y Dz_i en (m).
- ν : Módulo de Poisson del suelo.
- G_{maxi} : Módulo de corte dinámico máximo del suelo asociado a la sub-capa i de suelo.
- (G_o/G_{maxi}) : Degradación del módulo de corte dinámico obtenido mediante el SHAKE91.
- Dz_i : Espesor de la sub-capa i del suelo, coincidente con la discretización del pilote.

Se observa que K incorpora los efectos no lineales del suelo de una forma equivalente, dado que para cada sub-capa existe un único valor de la degradación del módulo de corte dinámico. Por otro lado, para definir el amortiguamiento de interacción se ha utilizado la formulación de Berger et. al (Ref.8), la cual supone que un pilote moviéndose horizontalmente puede únicamente generar ondas de compresión, P , viajando en la dirección del movimiento (2-D), y ondas de corte horizontal, SH , viajando en la dirección perpendicular al movimiento (1-D). Basado en lo anterior, Berger deriva la siguiente expresión:

$$C_{ri} = \frac{2}{g} * Dp * \gamma_s * V_s * \left[1 + \frac{V_p}{V_s} \right] * Dz_i \quad (2)$$

En donde:
$$V_{si} = \sqrt{\frac{G_{si} * g}{\gamma_{si}}} \quad \text{y} \quad V_p / V_s = \sqrt{2 * (1 + \nu)}$$

- C_{ri} : Coeficiente del amortiguador asociado a la sub-capa i del estrato de suelo. Posee unidades de (T-s/m).
 g : Aceleración de gravedad igual a 9.81 m/s².
 D_p : Diámetro o lado del pilote en la dirección del movimiento en (m).
 γ_s : Peso específico asociado a la sub-capa i del suelo en (T/m³).
 V_{si} : Velocidad de onda de corte asociado a la sub-capa i = $\sqrt{G_{oi} * g / \gamma_s}$

ANÁLISIS RESPUESTA DINÁMICA DEL SISTEMA PILOTE-ESTRUCTURA

Para determinar la respuesta sísmica del sistema pilote-estructura, se desarrolla un modelo tipo Penzien (Ref.1), en el cual el pilote y la superestructura se modelan mediante masas concentradas conectadas por elementos barra. Las masas concentradas del pilote quedan conectados al suelo mediante resortes y amortiguadores en paralelo de interacción que representan la interface suelo-pilote.

La ecuación de equilibrio dinámico para solicitaciones debidas a aceleraciones impuestas a la estructura viene dada por la siguiente expresión:

$$[M] \{\ddot{u}_T\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (3)$$

Si la estructura es solicitada por aceleraciones impuestas en varios puntos del modelo, tal como se muestra en la figura (2a), la ecuación de transformación sería:

$$\{\ddot{u}_T\} = \{\ddot{u}\} + [G] \{\ddot{u}_s\} \quad (4)$$

Los términos de la matriz [G], de dimensión n*(n-1), se obtienen de la matriz de transformación de desplazamientos del suelo, cuya componente G_{ij} representa al movimiento del nodo i debido a un valor unitario de u_{sj} , y valores nulos de los restantes u_{sk} ($k=1,2,\dots,n-1; k \neq j$). En la figura (2b) se muestra gráficamente el significado de los términos de la matriz [G].

Reemplazando la ecuación (4) en la ecuación (3) y agrupando términos, se obtiene:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = -[M][G] \{\ddot{u}_s\} = \{P_{eff}(t)\} \quad (5)$$

La ecuación (5) representa el problema planteado para el caso general de varios registros sísmicos horizontales aplicados en forma simultánea, los cuales varían en el tiempo y en el espacio. La resolución de las ecuaciones se realiza con la técnica de integración paso a paso empleando el método de θ -Wilson, con un factor $\theta=1.4$, y un paso de integración $\Delta t=0.0001 \text{ s} < T_{min}/10$, en donde T_{min} corresponde al menor periodo del sistema SPE.

La matriz de rigidez $[K]$, de dimensión $n \times n$, es llena y corresponde a la condensación estática de los giros y desplazamientos verticales en todos los nodos del pilote. El efecto de los resortes de interacción suelo-pilote quedan insertos en la diagonal de esta matriz acoplada. Las matrices $[M]$ y $[C]$, por su parte, corresponden a las matrices diagonales de masa y amortiguamiento del sistema suelo-pilote-estructura, respectivamente.

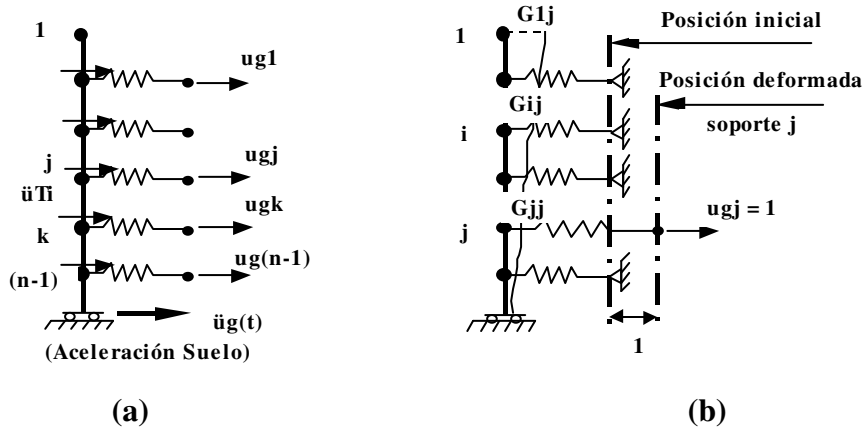


Figura 2: (a) Sistema solicitado por varios registros sísmicos simultáneos; (b) Evaluación componentes de la matriz $[G]$ de transformación de desplazamientos del suelo, G_{ij} .

ANÁLISIS PARAMETRICO

Se realizó un análisis paramétrico, en el cual se estudiaron las siguientes variables: rigidez del pilote ($D_p=1.0$ y 1.5 m), rigidez del suelo (grava v/s arcilla), geometría del depósito de suelo (variaciones en su espesor), índice de plasticidad de la arcilla ($IP=15$ y 30), restricción al giro en la cabeza del pilote (libre v/s empotrada), rigidez de interacción suelo-pilote (no linealidad), amortiguamiento de interacción, y período natural de la superestructura (supuesta empotrada en la base). En la figura 3 se muestra una típica cepa de puente denominada “pila-pilote” o “cepa-pilote”. Para simular un empotramiento en la cabeza del pilote y estudiar su efecto se consideró un resorte al giro de valor muy elevado.

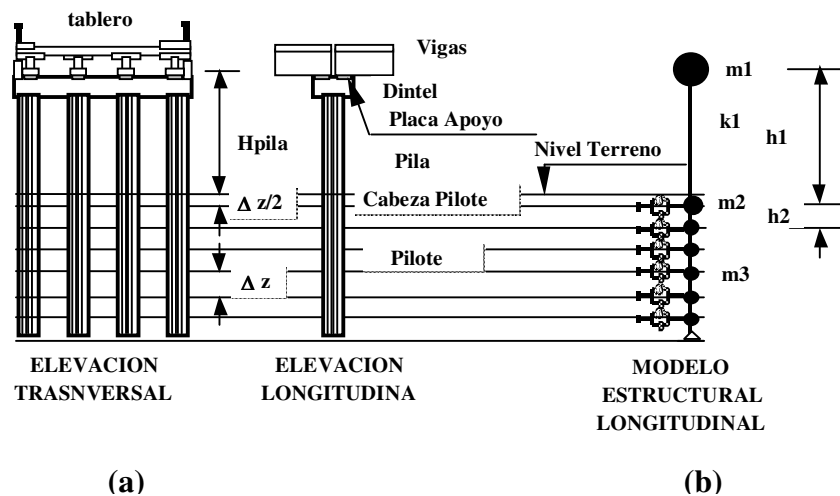


Figura 3: (a) Elevación longitudinal y transversal de una cepa-pilote; (b) Modelo estructural propuesto.

De acuerdo a los resultados, los parámetros más relevantes en la respuesta sísmica del sistema suelo-pilote-estructura corresponden a la Restricción al giro en la cabeza al pilote, Rigidez del pilote, Rigidez de interacción suelo-pilote y Período de la superestructura. Por el contrario, los parámetros menos relevantes son el amortiguamiento y el índice de plasticidad de la arcilla.

En la figura 4 se observa que la presencia de una restricción al giro completa en la cabeza del pilote, condición que se produce en una batería de pilotes, los momentos peak en la superestructura aumentan dramáticamente, efecto que se potencia en el caso de la arcilla (143%). Estos resultados indican que la presencia de una restricción al giro filtra en forma importante la fuerza inercial proveniente desde la superestructura.

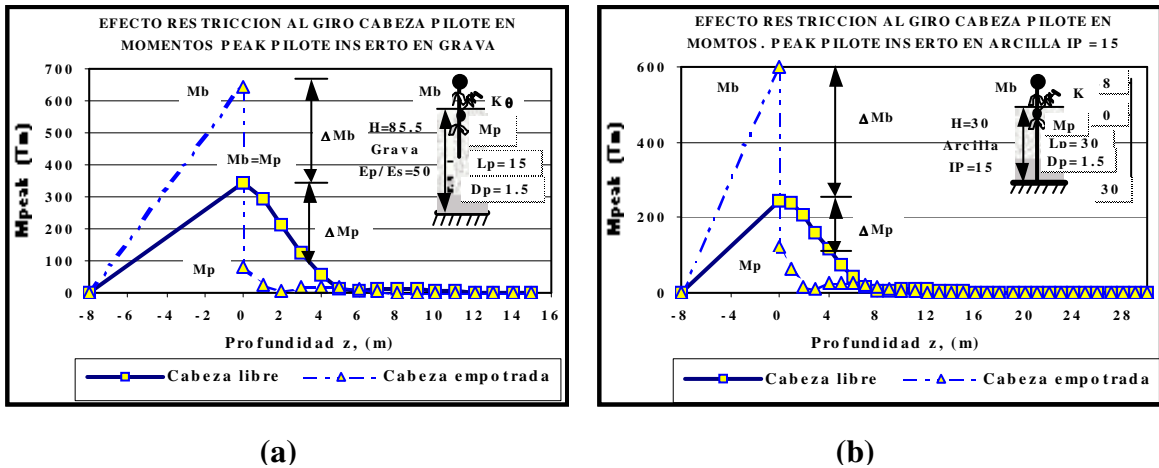


Figura 4: Efecto restricción al giro en la cabeza del pilote en momentos peak:
(a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15.

En la figura 5 se observa que para suelos de baja rigidez como la arcilla, la no linealidad del suelo (menores valores de K), induce reducciones importantes en la respuesta del sistema. Para el caso de suelos de alta rigidez (grava), las reducciones son inferiores debido a que se compensan los efectos de no linealidad y pérdida de soporte lateral.

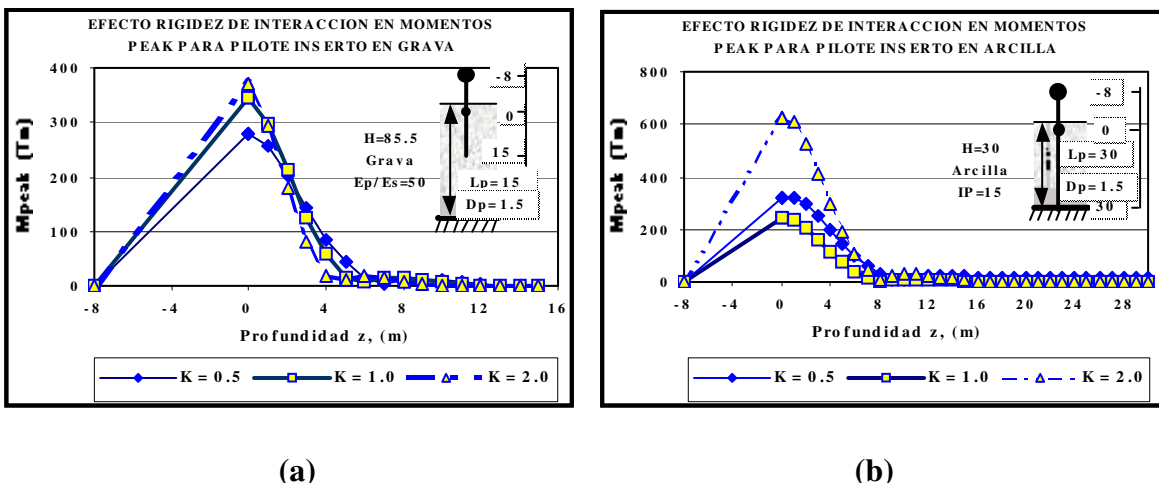


Figura 5: Efecto del Rigidez de interacción en momentos peak: (a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15. (K=0.5 equivale a un 50% del valor propuesto)

En la figura 6 se observa que variaciones en el rango de 50% a 100% en el amortiguamiento de interacción, respecto del valor base propuesto, la respuesta del sistema varía en el rango -4.4% a $+2.4\%$, resultados que se comparan favorablemente por aquellos obtenidos por Boulanger (Ref.7). Por otro lado, la ausencia de amortiguamiento de interacción genera aumentos irreales de las aceleraciones, comprometiendo la convergencia del método, conclusiones que concuerdan plenamente con los resultados obtenidos por Gazetas et al. (Ref.5).

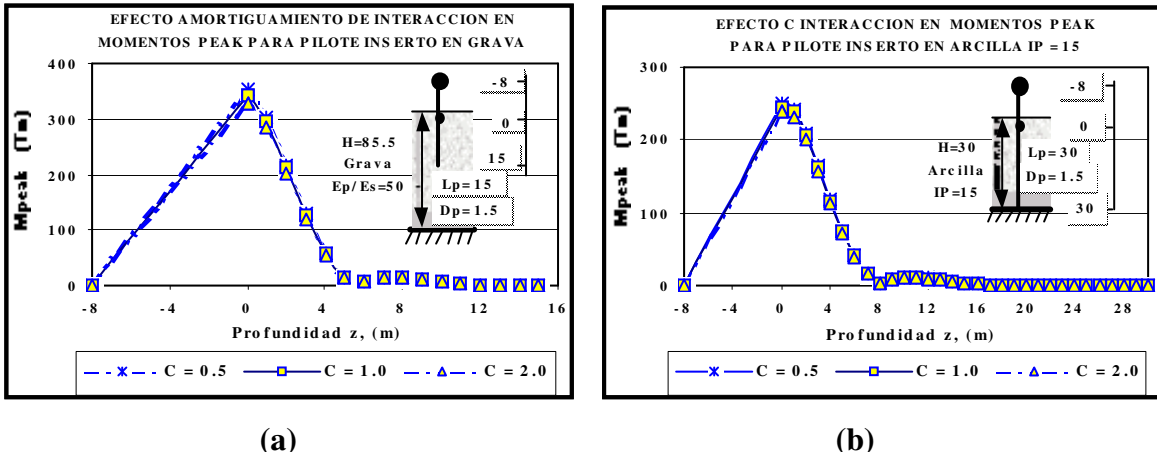


Figura 6: Efecto del Amortiguamiento en momentos peak: (a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15. (C=0.5 equivale a un 50% del valor propuesto)

EFEECTO ASISMICO DEL PILOTE

Uno de los puntos importantes desarrollados en el estudio, corresponde a la capacidad que posee el pilote de modificar la respuesta de campo libre que se ha representado por registros de aceleraciones aplicados en cada punto específico del pilote. En la figura 7 se compara los espectros de aceleraciones entre la respuesta de campo libre del suelo (RCL) y la cabeza del pilote, considerando la condición de cabeza libre y empotrada, concluyéndose lo siguiente:

- Claramente la condición de restricción al giro de la cabeza del pilote filtra en forma sustancial la respuesta de campo libre, toda vez que impide que una parte importante de la fuerza inercial de la superestructura se transmita hacia los pilotes.
- Comparativamente, se observa que la interacción cinemática entre la superestructura y el pilote es de mayor relevancia en suelos de baja rigidez tales como la arcilla, dado que la respuesta del pilote se eleva en forma importante por sobre la del suelo en periodos cercanos al fundamental del sistema SPE, lo cual es debido a la fuerza inercial de la superestructura.
- Debido al desfase en el contenido de frecuencias entre la respuesta de campo libre del suelo (1.0 a 2.5 Hz) y el pilote (1.0 a 0.5 Hz), la respuesta espectral máxima también se desfasa, produciéndose notorias reducciones en la respuesta del pilote. Este desfase entre los máximos peak de respuesta espectral es menor en el caso del pilote inserto en arcilla. La condición peligrosa se produce cuando el contenido de frecuencias del registro sísmico coincide con aquel del sistema SPE, induciendo la resonancia del sistema.

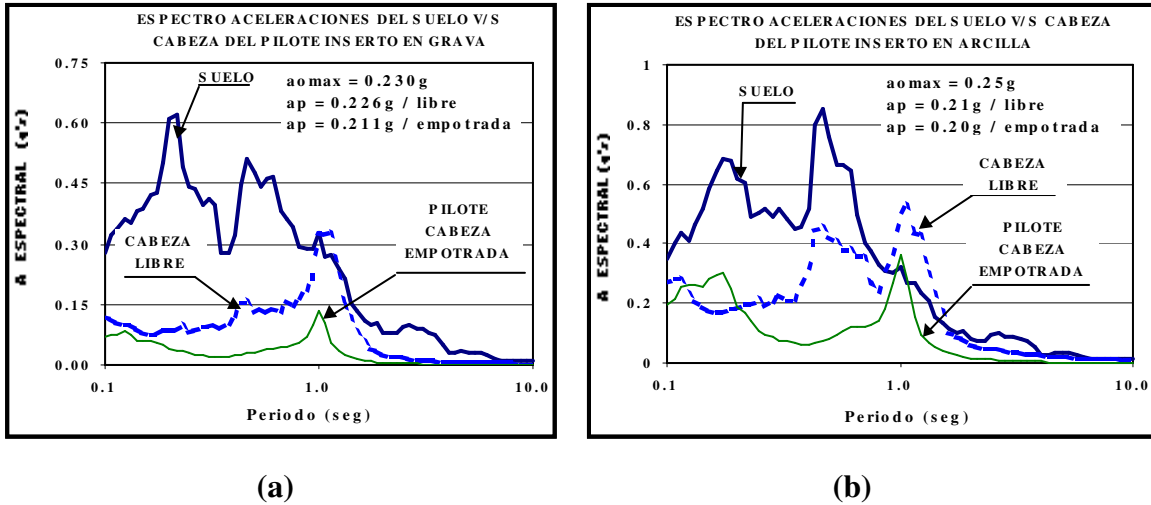


Figura 7: Espectro Aceleraciones del suelo v/s cabeza del pilote libre y empotrada: (a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15.

Estos resultados se comparan favorablemente con las mediciones realizadas sobre el puente Ohaba-Ohashi (Ref.4), los cuales se muestran en la figura 8, en la que se observa el espectro de amplificación entre el dado de fundación (footing) y el suelo (ground) para la dirección longitudinal al puente (H1) y transversal (H2). Nótese que para la dirección H2, la repuesta de la zapata supera a la respuesta del suelo para períodos en torno a 1.6 seg., debido al efecto de las fuerzas inerciales de la superestructura, lo cual coincide con lo obtenido en el figura 7.

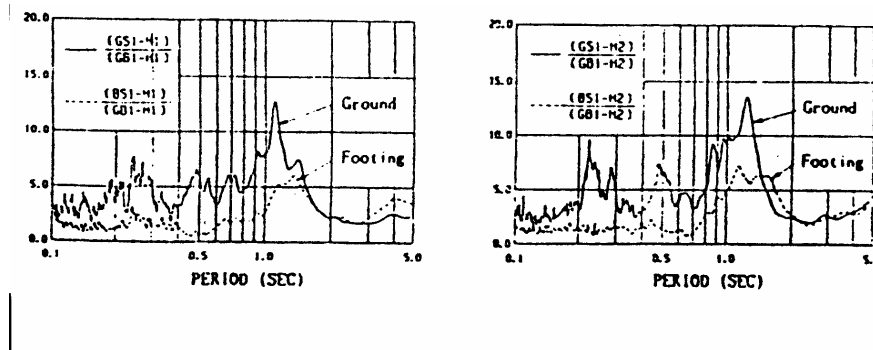


Figura 8: Funciones de transferencia entre la superficie (GS1) y la base (GB1), y entre la zapata (GS1) y la base. (Ref.4)

COMPARACION MODELO SPE Y MODELO CONVENCIONAL

Es de interés contrastar los resultados obtenidos por el modelo SPE propuesto y aquellos obtenidos aplicando un modelo convencional de análisis, con el objeto de visualizar la seguridad en los diseños que involucran estos métodos. Los estudios comparativos se realizaron para pilote con cabeza libre y empotrada, tomando como base la geometría definida para el sistema SPE (figura 3).

Para el modelo convencional se ha considerado utilizar el método del coeficiente sísmico modificado por el periodo fundamental del sistema. El espectro utilizado corresponde al recomendado en el volumen III del Manual de Carreteras en actual revisión (Ref.9).

En las figuras 9 y 10 se muestran los momentos peak para pilotes con cabeza libre y empotrada respectivamente, insertos en arcilla y grava. De los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Para pilotes con cabeza libre al giro (pila-pilote), los modelos entregan resultados similares, con diferencia no superiores al 20%.
- Para pilotes con cabeza empotrada (batería de pilotes), el modelo SPE entrega resultados muy superiores al modelo convencional (100%). Esto revela que los mecanismos de transmisión de carga del modelo convencional difieren con aquellos del modelo SPE de mayor realismo.

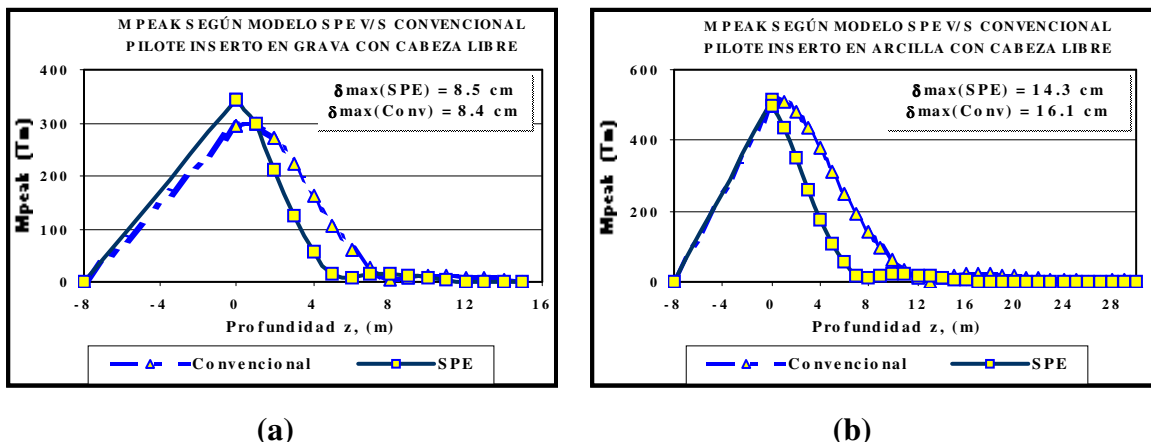


Figura 9: Momentos peak según modelo SPE v/s modelo convencional para pilote con cabeza libre al giro: (a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15.

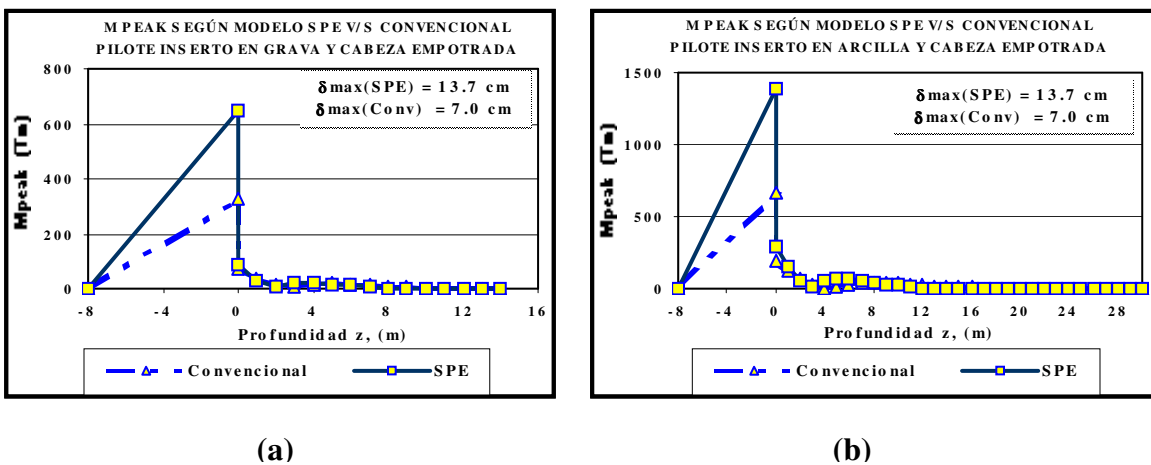


Figura 10: Momentos peak según modelo SPE v/s modelo convencional para pilote con cabeza empotrada: (a) Pilote inserto en Grava; (b) Pilote inserto en Arcilla IP = 15.

CONCLUSIONES GENERALES

La metodología presentada incorpora aspectos relevantes para el comportamiento sísmico del sistema suelo-pilote-estructura, permitiendo conocer de una forma más realista y racional los esfuerzos y deformaciones de la superestructura y pilotes. Se observa particularmente importante la presencia de restricción al giro en la cabeza del pilote, el cual actúa como filtro de las solicitaciones provenientes desde la superestructura, modificando sustancialmente el mecanismo de transmisión de la carga desde y hacia los pilotes, alejándose de los resultados obtenidos mediante análisis convencionales, los cuales no permiten capturar correctamente la respuesta sísmica del sistema (inseguros), dado que desprecian importantes fenómenos de interacción suelo-pilote-estructura.

El método se observa particularmente aplicable a suelos de baja rigidez tales como arcilla, en los cuales se potencia la interacción cinemática entre la superestructura y el pilote al compararse los contenidos de frecuencia entre el sistema SPE y la respuesta de campo libre, así como el comportamiento no lineal del suelo.

La tendencia futura en cuanto a proyectos de envergadura emplazados en suelos de baja rigidez será aplicar metodologías como las desarrolladas en el presente estudio, permitiendo realizar diseños más confiables, capturando el real comportamiento sísmico del sistema global. Especiales aplicaciones se visualizan para estructuras tales como Viaductos, Edificios, Muelles, entre otros.

REFERENCIAS

1. Penzien, J., Scheffey, C. and Parmelee, R., 1964. "Seismic Analysis of Bridges on Long Piles", Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 90, N° EM3.
2. Matlock, H., Martin, G., Lam, I. and Tsai, C., 1981. "Soil-Pile Interaction in Liquefiable Cohesionless Soils During Earthquake Loading", Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, Vol. II.
3. Gazetas, G., Mylonakis, G. and Nikolau, A., 1995. "Simple Methods for the Seismic Response of Piles Applied to Soil-Pile-Bridge Interaction", Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Abril 2-7, Volume III.
4. Ohira, A. et al., 1984. "Observations of Earthquake response behaviors of foundations piles for road Bridge", Proc. VIII World Conference on Earthquake Eng., Vol III, San Francisco.
5. Boulanger, R., Curras, C., Kutter, B., Wilson, D. and Abghari, A., 1999. "Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, September, p. 750-759.
6. Idriss, I. and Sun, J., 1992. "User's Manual for SHAKE91", Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, California.
7. Guendelman, Tomás, 2001. "Programa ASPEN", comunicación personal.
8. Gazetas, George y Dobry, Ricardo, 1984. "Horizontal Response of Piles in Layered Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, N° 1.
9. Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2001. "Actualización de los Volúmenes 2 y 3 del Manual de Carreteras", Departamento de Estudios, Volumen 3, Santiago.