

INFLUENCIA DEL AMBIENTE SISMICO EN LOS ESPECTROS SISMICOS DE PISO

Marcelo A. Ceballos, Ing. Civil
Carlos A. Prato, Ing. Civil

RESUMEN

En este trabajo se analiza el efecto que tienen en la respuesta de la estructura dos maneras alternativas de definir el conjunto de ondas sísmicas para el diseño, lo que es referido habitualmente como "ambiente sísmico". A tal fin se analiza la respuesta de un sistema suelo-estructura genérico consistente en un medio continuo que representa el terreno de fundación, la fundación o interfaz de la estructura con el terreno, y una superestructura en la que se requiere definir los espectros de piso a considerar en el diseño o verificación sísmica de sistemas y componentes.

El análisis de la interacción cinemática y dinámica entre el terreno y la estructura se analiza mediante un modelo simplificado de la superestructura y la fundación a través del programa SASSI en el que se representa una fundación rígida flotante en un semiespacio elástico homogéneo.

Los resultados obtenidos para estos casos genéricos que son representativos de construcciones fundadas en estratos profundos de suelos ilustran la influencia que tiene el ambiente sísmico que se adopta para calcular las demandas sísmicas en la estructura y en sus instalaciones.

ABSTRACT

The present work concerns with the analysis of the effect on the seismic response of a soil-structure system of two alternative forms of the seismic environment considered for design purposes. On one hand the classical scenario consisting of vertically travelling waves, two of them of the shear (S) type causing the horizontal components of acceleration and one of the P type causing the vertical component, and on the other hand considering that the seismic motions are Rayleigh waves. The response of a soil-structure system representing a typical high-rise building resting of thick soil deposits is carried out with the two scenarios in order to show the influence of that selection on the seismic demands on the structure and its installations.

Kinematic and dynamic interaction effects of soil and structure system are analyzed by means of the SASSI program, capable of representing a rigid foundation resting on a layered elastic half-space. Numerical results obtained show the influence of the seismic environment on seismic demands both for the structure itself as for the seismic design of internal electromechanical systems and components.

1. Introducción

El ambiente sísmico más comúnmente utilizado para el análisis sísmico de edificios y estructuras cuya dimensión en planta es relativamente pequeña frente a la longitud de ondas del campo libre, consiste en definir la acción sísmica a través de dos componentes horizontales del movimiento asociadas a dos familias no correlacionadas de ondas de corte que viajan verticalmente en el sitio, y una componente vertical asociada a una onda volumétrica. Otra manera menos corriente de definir el ambiente sísmico es considerando ondas superficiales de Rayleigh que inciden sobre el sitio en la forma de un tren de ondas plano de dos componentes perfectamente correlacionadas, una horizontal en la dirección de propagación de la onda y otra vertical. Ambos tipos de ambiente sísmico son relevantes según el mecanismo focal y profundidad del sismo, la distancia entre el foco y el sitio, el perfil estratigráfico del terreno de fundación, y la profundidad de las fundaciones.

El objetivo del presente trabajo consiste en ilustrar la influencia del ambiente sísmico en la respuesta sísmica de un edificio de acuerdo a la profundidad de las fundaciones. Este análisis se realiza a través de la función de transferencia, en términos de aceleración, del extremo superior de la estructura respecto a un punto de la superficie en el campo libre de la onda incidente denominado punto de control, para dos tipos diferentes de ambiente sísmico.

Por un lado, se considera el ambiente sísmico estándar en la práctica actual de diseño sísmico, en el que se supone que las componentes de aceleración horizontal son debidas a ondas de corte (S) y la componente vertical del movimiento a una onda volumétrica (P), propagándose todas estas ondas en la dirección vertical y siendo estadísticamente independientes. Este tipo de ambiente sísmico implica que el movimiento de campo libre en el sitio es independiente de la ubicación en planta de la estructura, y por lo tanto la onda incidente llega a la estructura a través del suelo de fundación en fase y con igual amplitud en todos los puntos de la fundación ubicados a igual profundidad.

Por otro lado, se considera el caso que la onda incidente es una de tipo Rayleigh cuyas componentes en el punto de control presentan relaciones de amplitud y de fase fijas y definidas. Estas ondas en general presentan una componente vertical de mayor amplitud que la horizontal en el sentido de propagación de la onda, entre las cuales hay una relación fija de fase. Este tipo de ambiente sísmico implica que la acción sísmica que incide sobre la estructura (*input* sísmico) contiene además de las componentes horizontales y de la vertical en el punto de control, una rotación del suelo respecto a un eje horizontal. Tanto el efecto de la correlación de las distintas componentes de la onda incidente, como la rotación del suelo respecto a un eje horizontal en el punto de control, se combinan de manera que la respuesta a ambos escenarios presenta resultados diferentes. La diferencia de respuesta frente a esos escenarios resulta función de la frecuencia que se considere, y de la profundidad de las fundaciones, lo que se manifiesta en forma clara en la Función de Transferencia (F.T.) en puntos representativos de la estructura. Dado que la F.T. cubre el rango completo de frecuencias de interés representativas de un análisis sísmico, su análisis permite estimar la influencia del ambiente sísmico para espectros de excitación sísmica que provengan de fuentes sismogénicas a distintas distancias del sitio.

A fin de ilustrar el efecto señalado en los párrafos precedentes, se ha analizado una estructura representada a través de un modelo unidimensional (*stick model*) de la superestructura. La fundación de la estructura ha sido idealizada como un bloque rígido de forma prismática cuyas dimensiones en planta coinciden con la planta de la estructura: 12 m de ancho (en el sentido normal al de propagación de las ondas Rayleigh) x 20 m de largo. El edificio representado por el *stick model* posee una altura total de 48 m desde la superficie del terreno, que resulta de considerar 16 pisos de 3 m de altura cada uno. El peso considerado para el edificio es de 30 t por metro de altura. A efectos de ilustrar la influencia de la profundidad de la fundación, se han considerado dos casos: (1) la base de la fundación rígida se encuentra a 6 m de profundidad, y (2) la base se ubica a 15 m de profundidad. En ambos casos, se ha supuesto que el suelo es un semiespacio elástico homogéneo con una velocidad de propagación de ondas de corte de 165 m/s, un coeficiente de Poisson de 1/3 y un peso específico de 1.6 t/m³. En el caso (1), la relación entre la profundidad “H” de la base de la fundación y el ancho en planta de la fundación “B” resulta $6/12 = 0.5$, mientras que en el caso (2) resulta $15/12 = 1.25$. En el sentido longitudinal de propagación de las ondas Rayleigh la relación entre la profundidad y la dimensión en planta tiene más influencia en los resultados que la otra relación, y varía entre $6/20 = 0.3$ y $15/20 = 0.75$. En la Figura 1 se presenta un esquema de los modelos implementados en el programa SASSI ^[1].

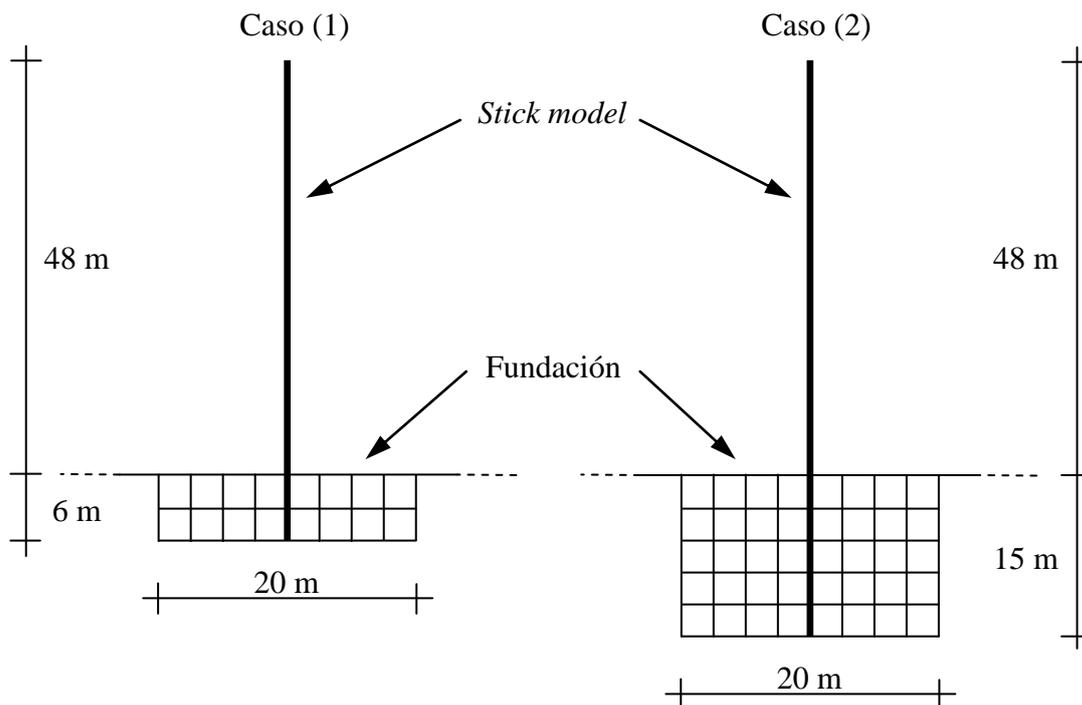


Figura 1. Corte de los modelos implementados en SASSI a través del plano vertical de simetría en la dirección de propagación de las ondas

En todos los casos analizados se definió un amortiguamiento histerético lineal de la superestructura (en el dominio de la frecuencia) que representa un amortiguamiento viscoso equivalente del 5%. El amortiguamiento adicional que se origina por la radiación de ondas desde la fundación, y que se manifiesta como un amortiguamiento viscoso que se incrementa con la frecuencia, está explícitamente considerado en el análisis de la interacción suelo-estructura con el programa SASSI.

2. Bases para la comparación de los resultados

A los efectos de tornar comparables los resultados para ambos ambientes sísmicos, se ha tomado como valor de referencia a la aceleración horizontal en campo libre en un punto de control ubicado en superficie a 50 m de distancia (horizontal) del eje vertical del modelo de la estructura. La obtención de la Función de Transferencia se realiza asignando un valor unitario a la componente horizontal armónica de la onda incidente en todo el rango de frecuencias de interés.

En el caso de las ondas de Rayleigh, la componente vertical del campo libre en el punto de control es mayor que la componente horizontal, mientras que en el caso de las ondas de corte la componente vertical es nula. En particular, interesa ilustrar las diferencias en la respuesta de la estructura según el ambiente sísmico que adopte el analista, especialmente en los espectros de respuesta considerados representativos de las acciones sísmicas en el sitio.

La estructura está representada por un modelo tipo “*stick*” cuya rigidez se ajusta a los efectos de imponer en ambos casos analizados una frecuencia fundamental (incluyendo el efecto de la flexibilidad de las fundaciones) de 2 Hz.

3. Respuesta de la estructura

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las funciones de transferencia de las aceleraciones de la terraza y la base de la estructura (a nivel de la superficie del terreno) respecto a la aceleración horizontal del punto de control, tomando para ambos casos analizados un ambiente sísmico compuesto por ondas R. En las Figuras 5 y 6 se muestran las funciones de transferencia de las aceleraciones horizontal y angular de la estructura respecto al punto de control para un ambiente sísmico constituido por ondas S. En este último caso, a diferencia del anterior, no se inducen aceleraciones verticales sobre la estructura.

La comparación de las Figuras 2 y 5 permite apreciar que la aceleración horizontal máxima en la terraza del edificio para el ambiente sísmico de ondas R es más de 3 veces mayor respecto al de ondas S para el caso (1), y más de 2 veces mayor para el caso (2). Esta diferencia no resulta tan notoria para el caso de las aceleraciones de la base, por lo que se infiere que la influencia del tipo de escenario resulta mucho más significativa en los puntos alejados de la fundación.

Las curvas de la Figura 3 tienden para bajas frecuencias a un valor próximo a 1.6 que coincide con la relación entre las componentes vertical y horizontal de las ondas de Rayleigh para el coeficiente de Poisson adoptado. Se observa que la aceleración vertical de la estructura se mantiene por encima de la componente horizontal del punto de control (igual a la unidad) para frecuencias inferiores a la frecuencia fundamental del sistema suelo-estructura. Tal como ya se ha mencionado, el escenario de una onda S no produce respuesta vertical del sistema suelo-estructura.

El análisis de la Figura 4 muestra que las aceleraciones angulares máximas del caso (1) superan a las del caso (2), e incluso que las aceleraciones de la base del caso (1) son mayores a las de la terraza del caso (2). La comparación de las Figuras 4 y 6 permite apreciar que las aceleraciones angulares para el ambiente de ondas R son

hasta 4 veces mayores respecto al ambiente de ondas S. La aceleración angular para frecuencias inferiores a 0.5 Hz resulta prácticamente nula para ondas S, mientras que para ondas R resulta casi 10 veces más que la correspondiente a las ondas S para frecuencias por debajo de 1 Hz. Precisamente, esta aceleración angular es debida en parte al *input* rotacional de la excitación incidente en el punto de control y en parte a las aceleraciones horizontales en los distintos puntos de la estructura, lo que explica la diferencia de respuesta para estos dos escenarios del ambiente sísmico definidos a través de la componente horizontal de aceleración en el punto de referencia (campo libre en superficie).

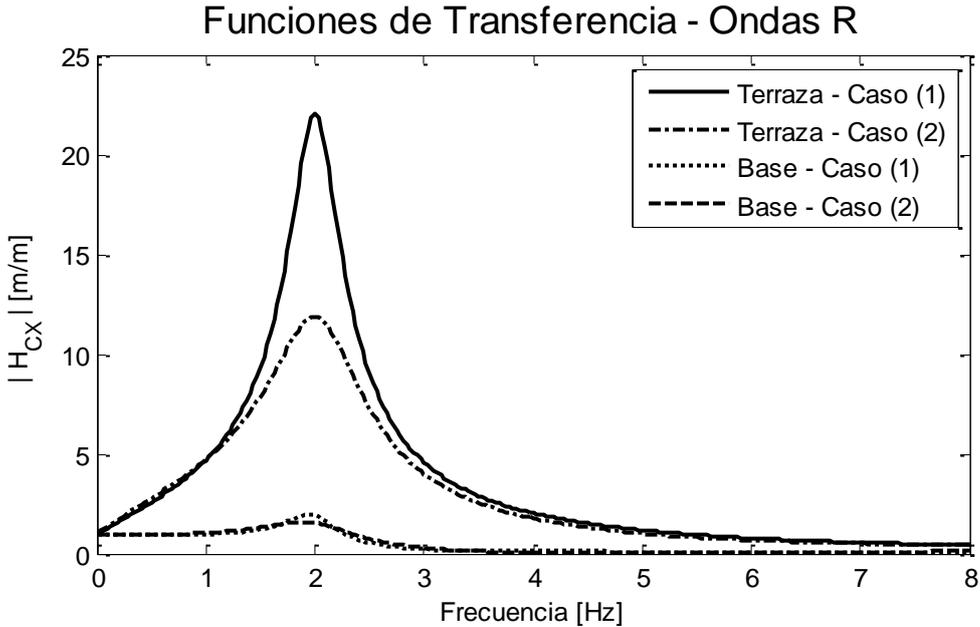


Figura 2. Función de transferencia de la aceleración horizontal en la estructura respecto a la aceleración horizontal del punto de control para Ondas R

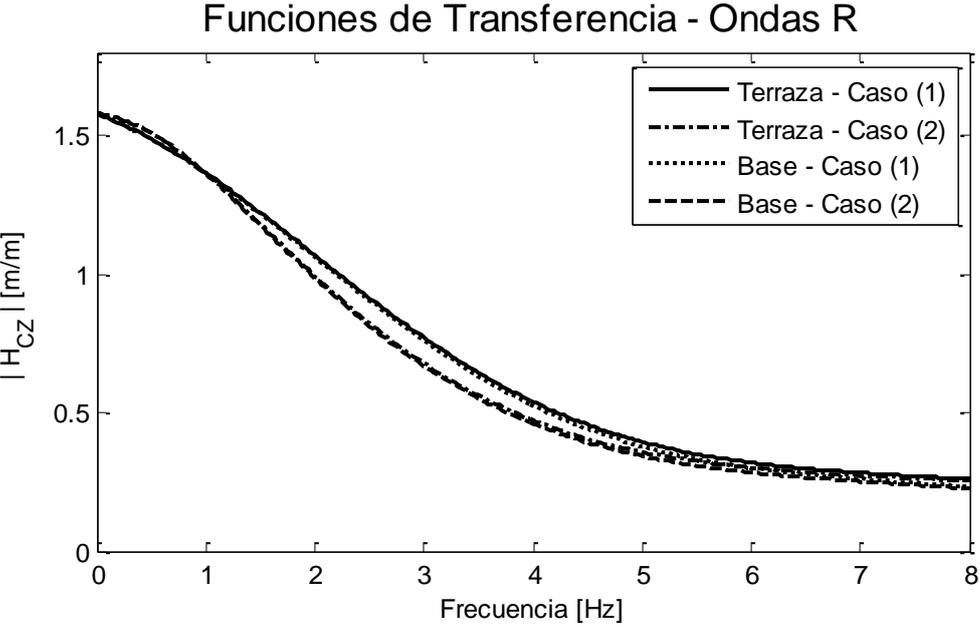


Figura 3. Función de transferencia de la aceleración vertical en la estructura respecto a la aceleración horizontal del punto de control para Ondas R

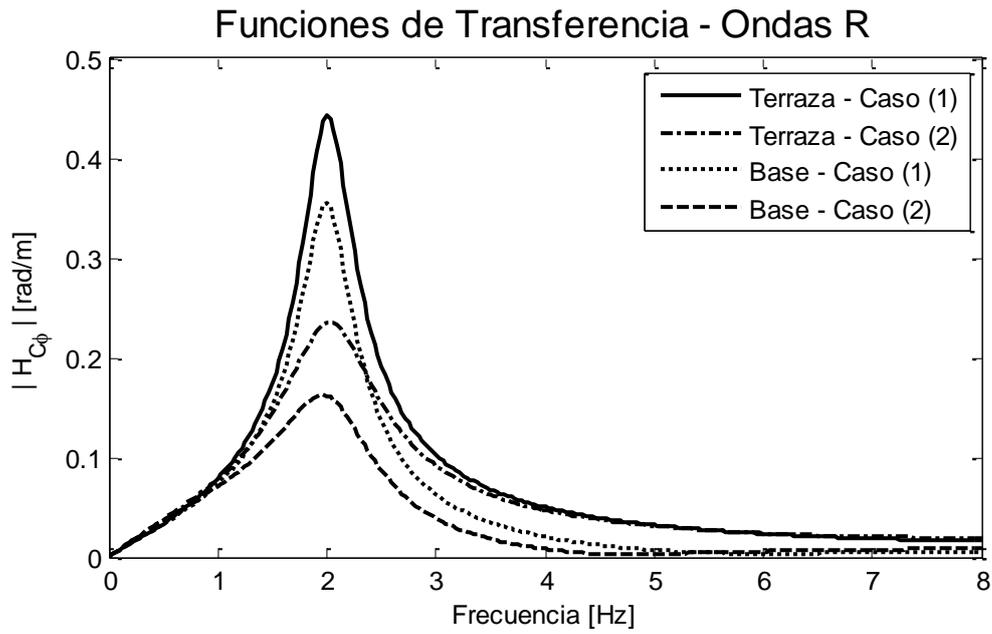


Figura 4. Función de transferencia de la aceleración angular en la estructura respecto a la aceleración horizontal del punto de control para Ondas R

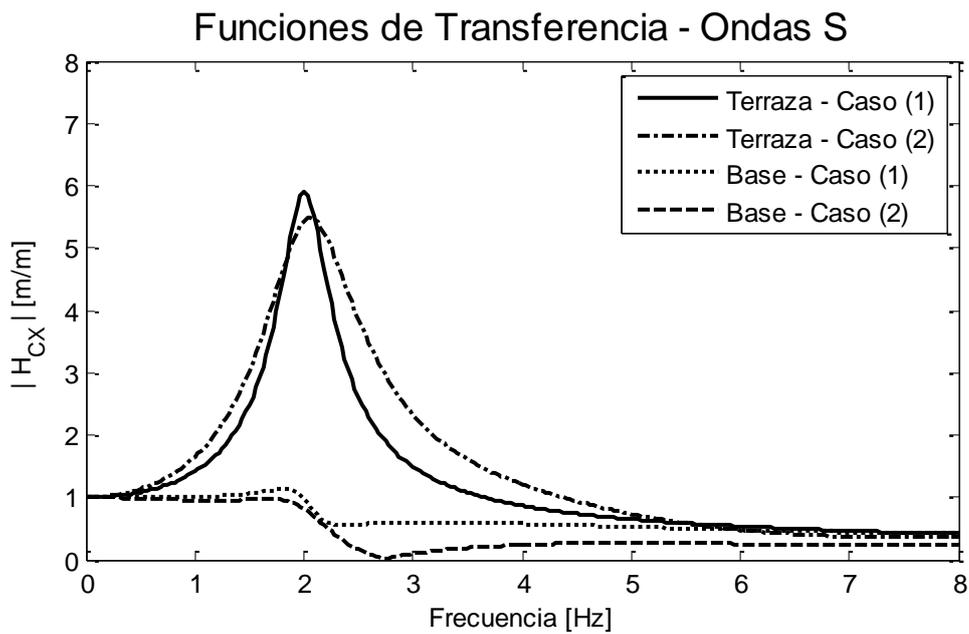


Figura 5. Función de transferencia de la aceleración horizontal en la estructura respecto a la aceleración horizontal del punto de control para Ondas S

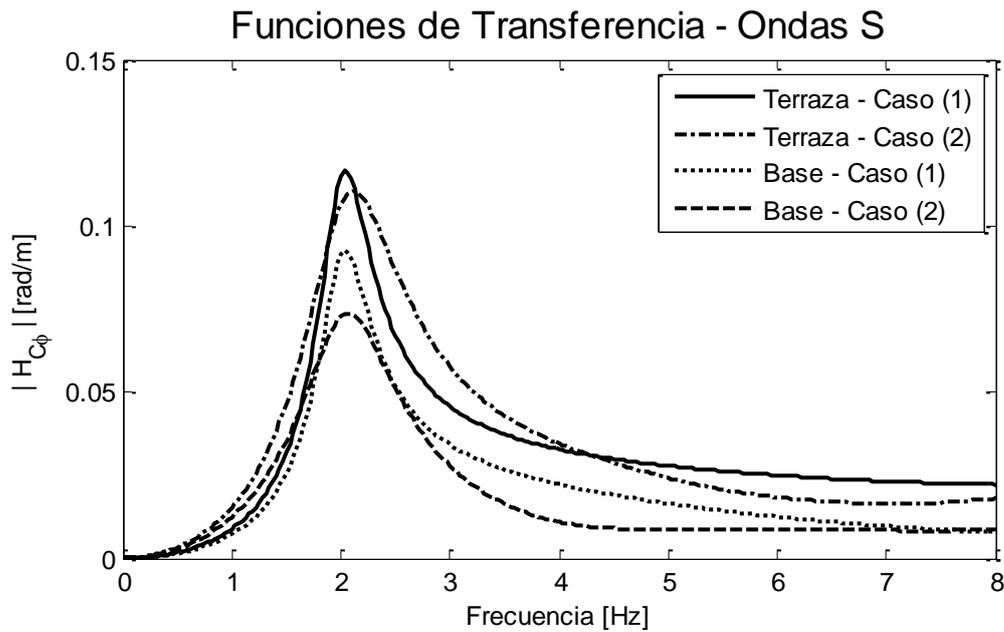


Figura 6. Función de transferencia de la aceleración angular en la estructura respecto a la aceleración horizontal del punto de control para Ondas S

4. Espectros de Piso

Para completar el análisis desarrollado en la sección anterior sobre la respuesta de la estructura a excitaciones armónicas, a continuación se estudia la influencia del ambiente sísmico de la misma estructura sobre los espectros de piso en el punto más sensible que es el de mayor elevación sobre las fundaciones (terrace).

A tal fin, se consideran como *input* sísmico en el punto de control a los registros de las componentes de aceleración de cuatro sismos reales de diferente intensidad y contenido de frecuencias, todos normalizados a igual amplitud de aceleración horizontal. A los efectos del presente análisis se ajustan los acelerogramas de modo que todos los sismos presenten una aceleración máxima horizontal (*PGA*) de 0.1 g, respetando las relaciones de fase y de amplitud originales de los registros entre la componente horizontal y la vertical en el punto de control.

Tal como se comenta en la sección 2, la rigidez propia de la superestructura se ajusta de manera que para ambos casos de profundidad de fundaciones estudiados, 6 y 15 m, la frecuencia fundamental del edificio sea de 2 Hz. Esto se realiza con la intención de separar lo más posible la influencia del ambiente sísmico de otros factores que afectan la respuesta de una estructura. En realidad, si la superestructura considerada fuese la misma para ambos casos, las frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura serían diferentes dada la mayor rigidez que aporta la fundación de mayor profundidad. De todos modos, el análisis con la misma rigidez para ambas profundidades presenta diferencias en los resultados entre los dos tipos de ambiente sísmico totalmente concordantes con los que se obtienen manteniendo fija la frecuencia fundamental de ambos casos en 2 Hz.

Las Figuras 7 a 10 presentan los espectros de piso del 5% de amortiguamiento para cuatro registros sísmicos diferentes y las 2 profundidades de fundación adoptadas.

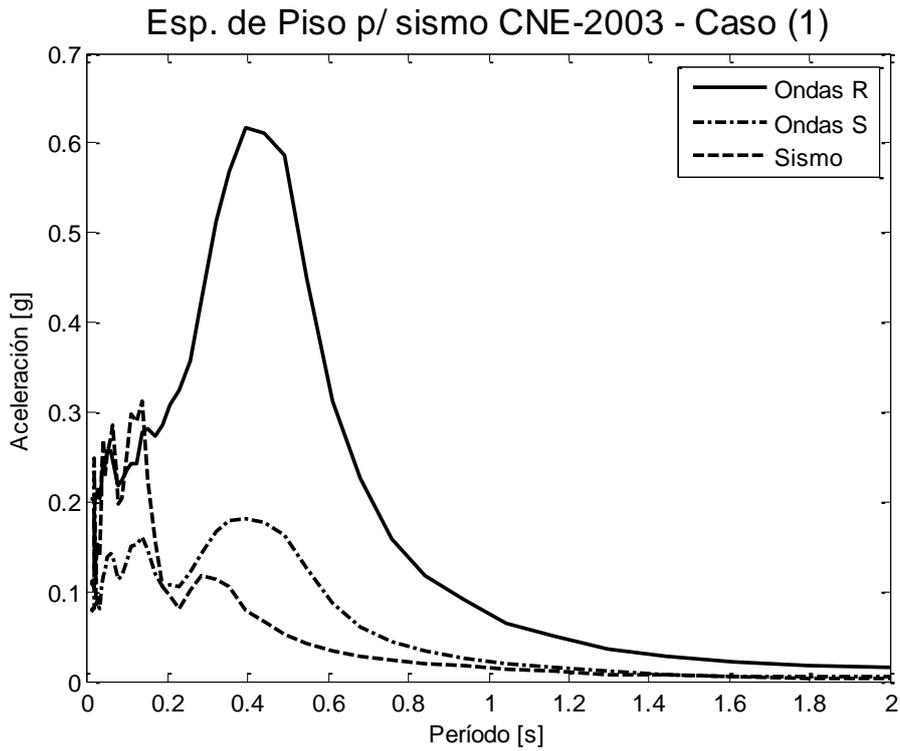


Figura 7.a. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Central Nuclear de Embalse en Diciembre de 2003. Profundidad de la fundación: 6 m

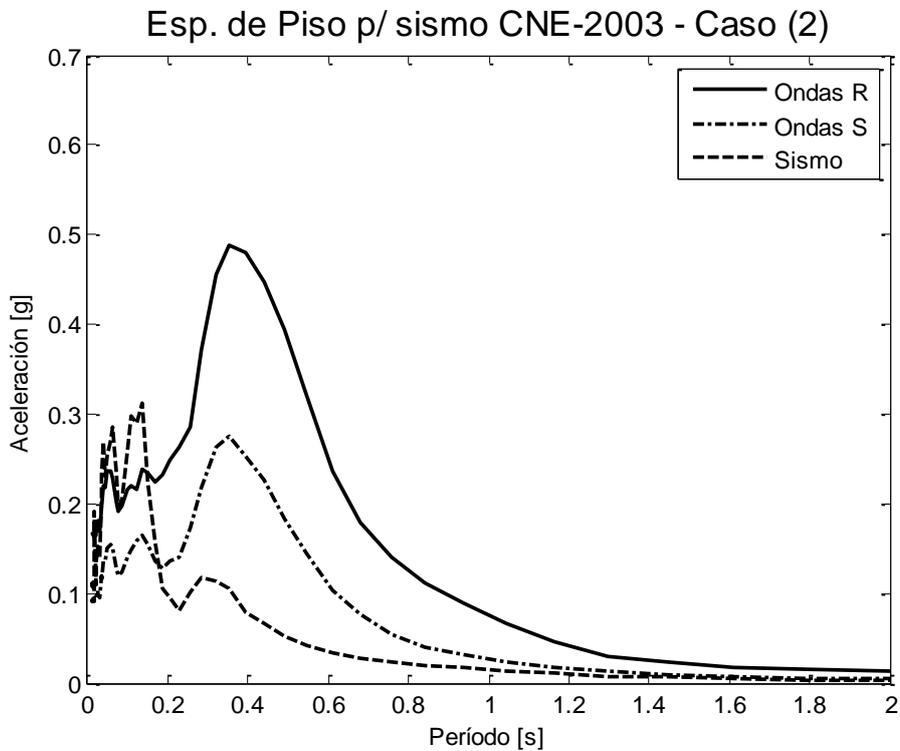


Figura 7.b. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Central Nuclear de Embalse en Diciembre de 2003. Profundidad de la fundación: 15 m

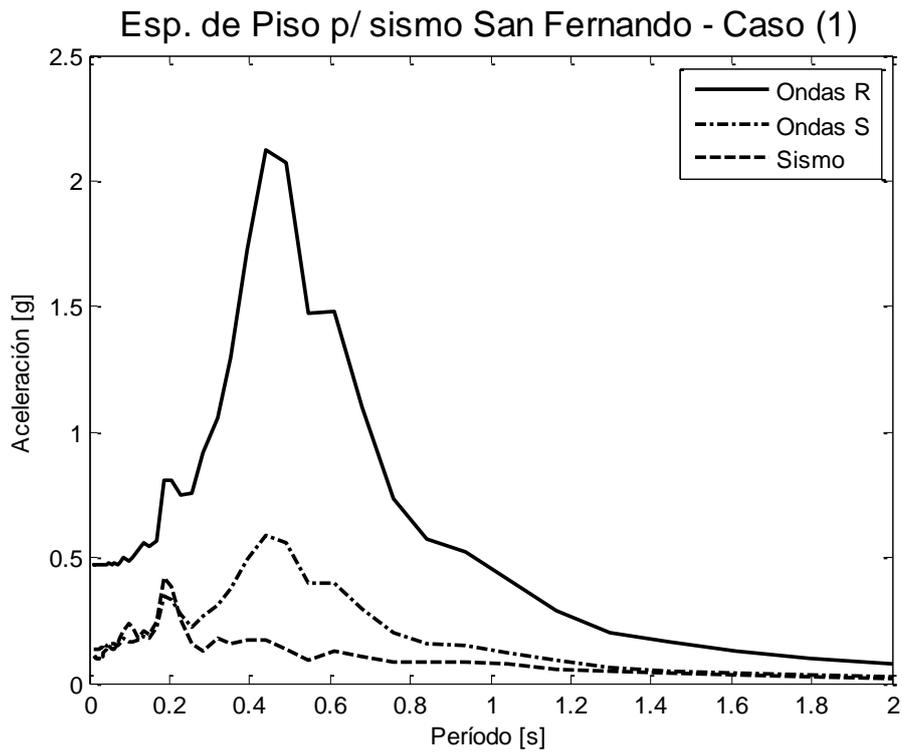


Figura 8.a. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en San Fernando. Profundidad de la fundación: 6 m

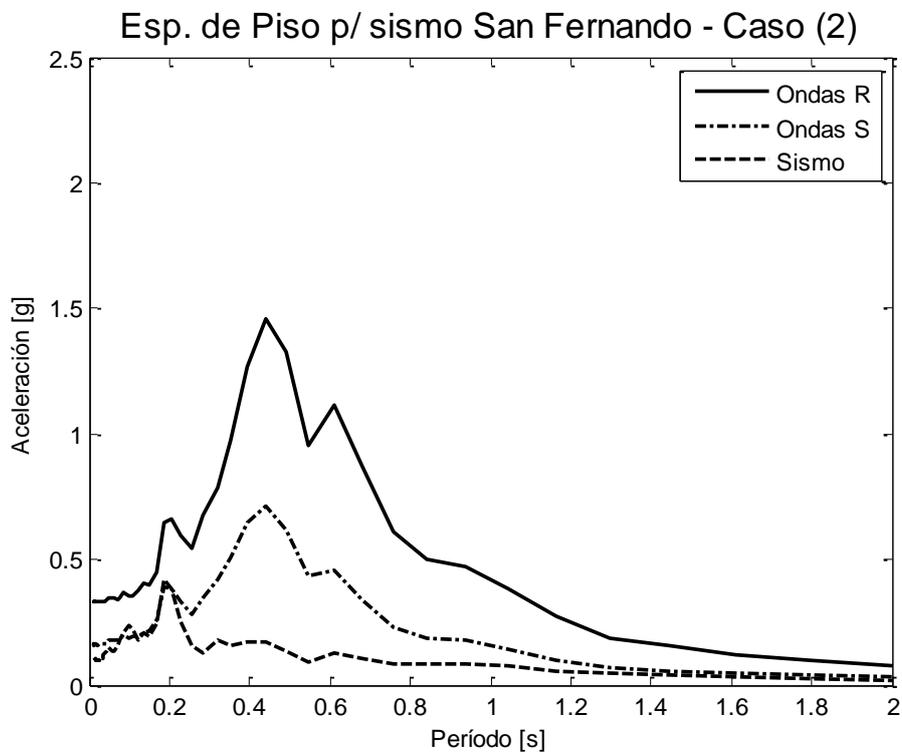


Figura 8.b. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en San Fernando. Profundidad de la fundación: 15 m

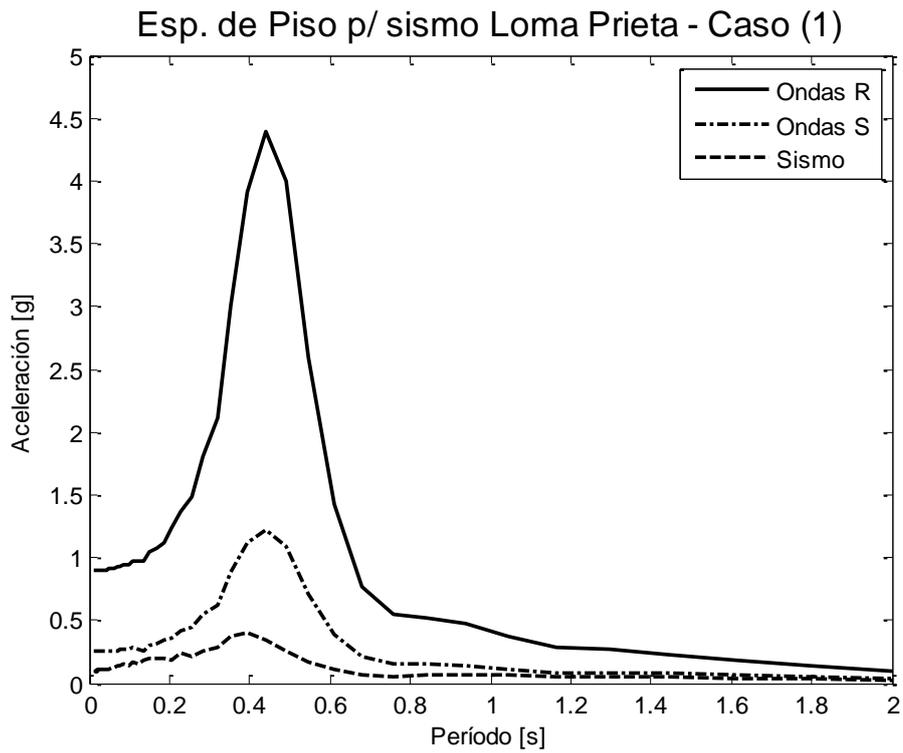


Figura 9.a. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Loma Prieta. Profundidad de la fundación: 6 m

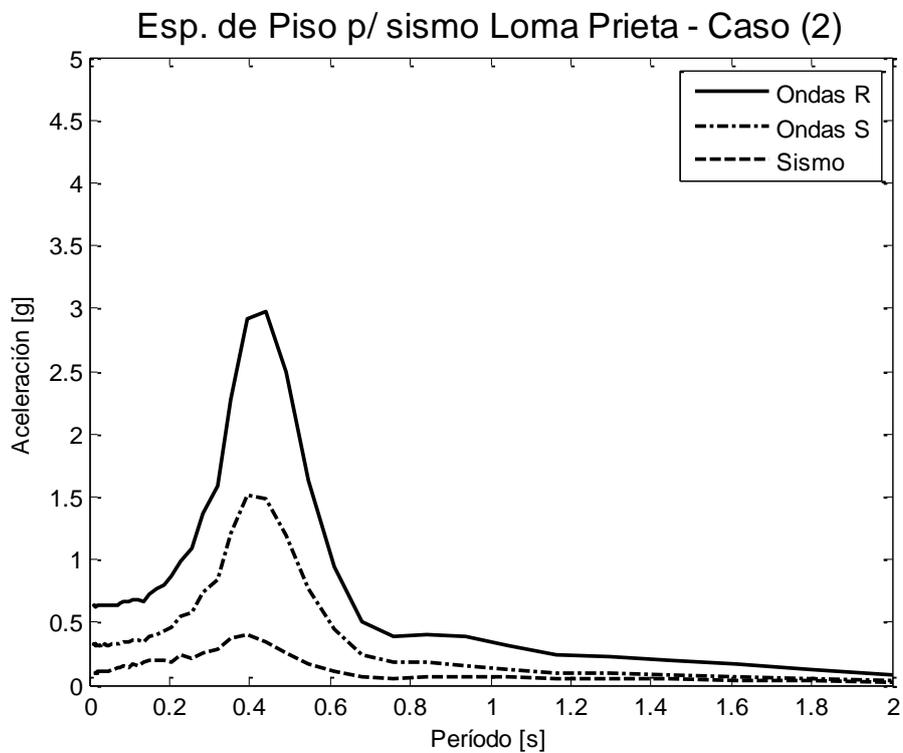


Figura 9.b. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Loma Prieta. Profundidad de la fundación: 15 m

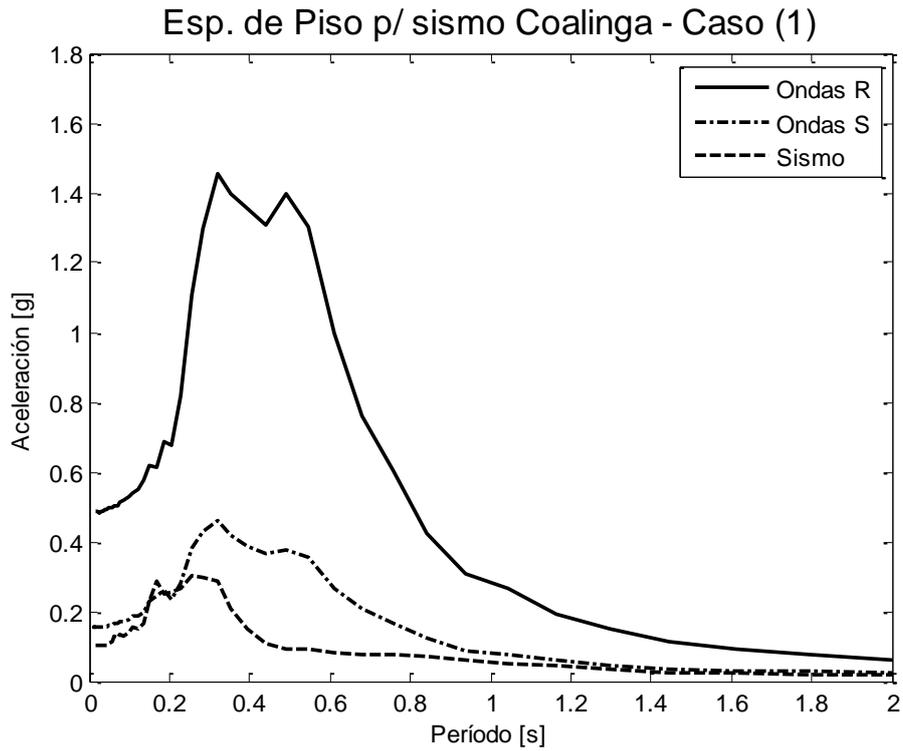


Figura 10.a. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Coalinga. Profundidad de la fundación: 6 m

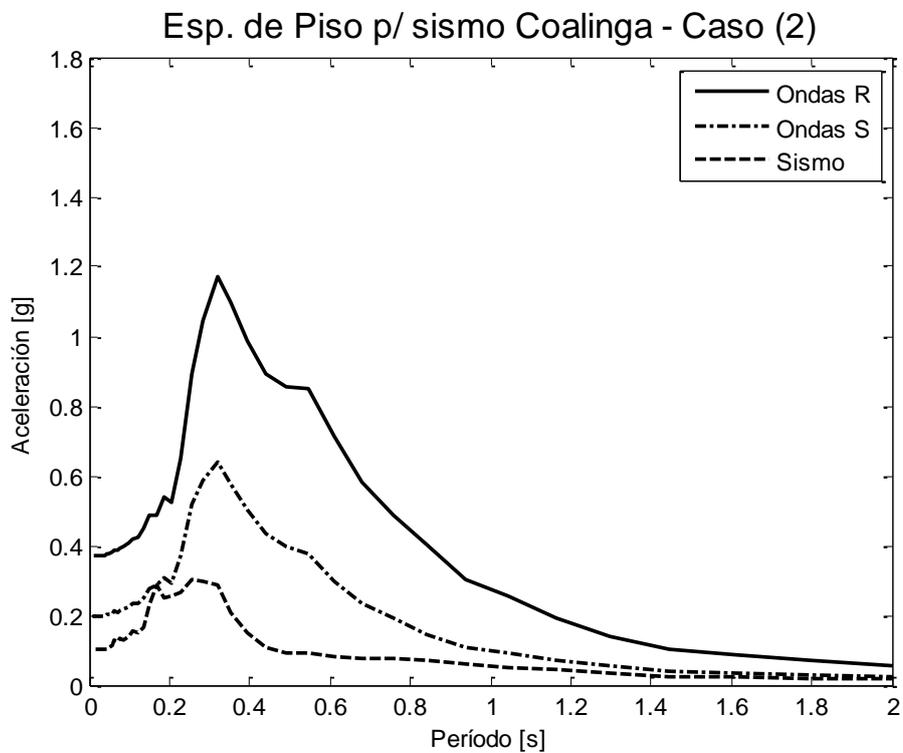


Figura 10.b. Espectro de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior de la estructura para el sismo registrado en Coalinga. Profundidad de la fundación: 15 m

En estas figuras queda muy claramente ilustrada la influencia que tiene el escenario sísmico que se considere en el cálculo de espectros de piso. La Figura 11 presenta los promedios de los espectros de piso obtenidos para los cuatro sismos, que ponen en evidencia la influencia de tiene el ambiente sísmico que se considere en el cálculo de los espectros de piso para dos profundidades diferentes de la fundación.

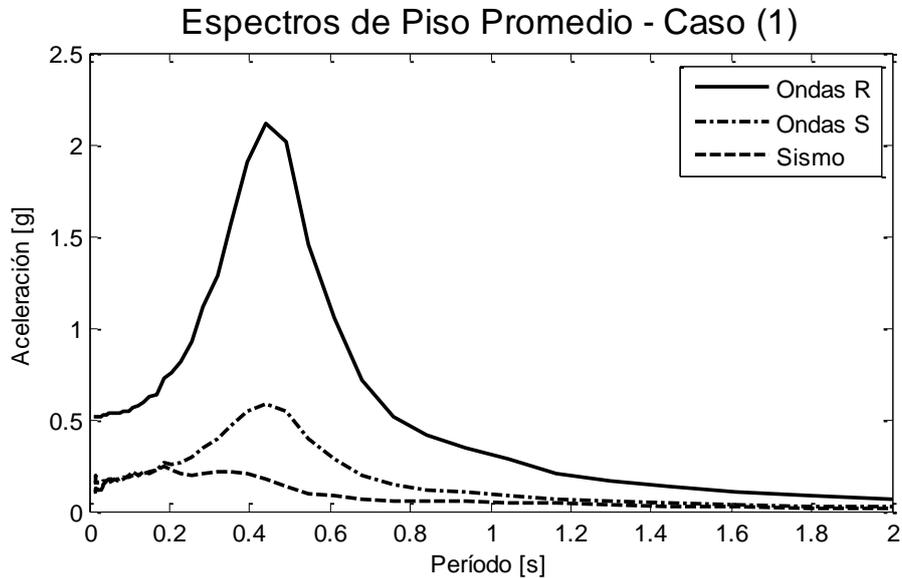


Figura 11.a. Espectros de piso promedio de la aceleración horizontal en el extremo superior del edificio para el caso de fundación de 6 m de profundidad

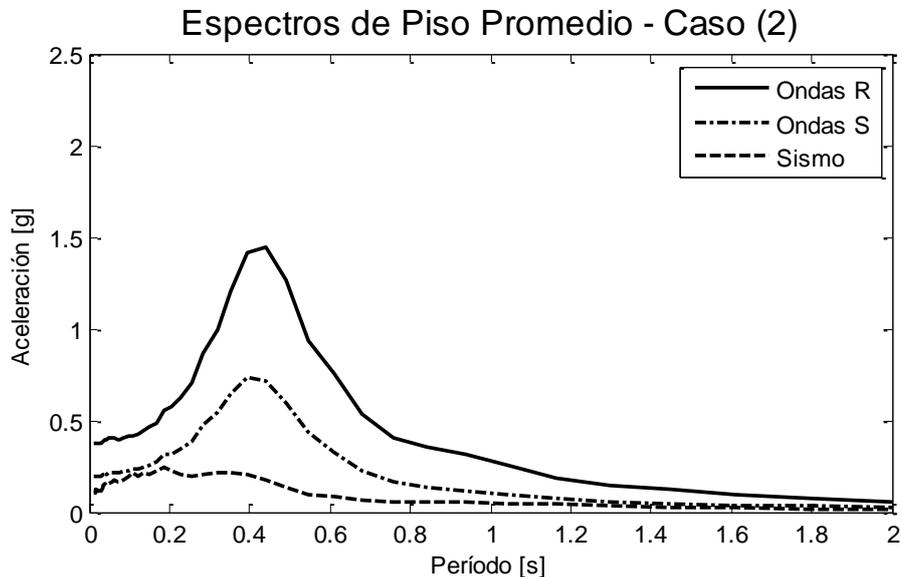


Figura 11.b. Espectros de piso promedio de la aceleración horizontal en el extremo superior del edificio para el caso de fundación de 15 m de profundidad

La Figura 12 presenta los espectros de piso para el sismo de Loma Prieta en la hipótesis que la superestructura tiene la misma rigidez para ambas profundidades de fundación. Se puede apreciar que si bien los picos de aceleración se han corrido hacia un período algo menor y las amplitudes del pico principal son algo mayores, la influencia del tipo de escenario sísmico no difiere apreciablemente de la obtenida con la hipótesis original.

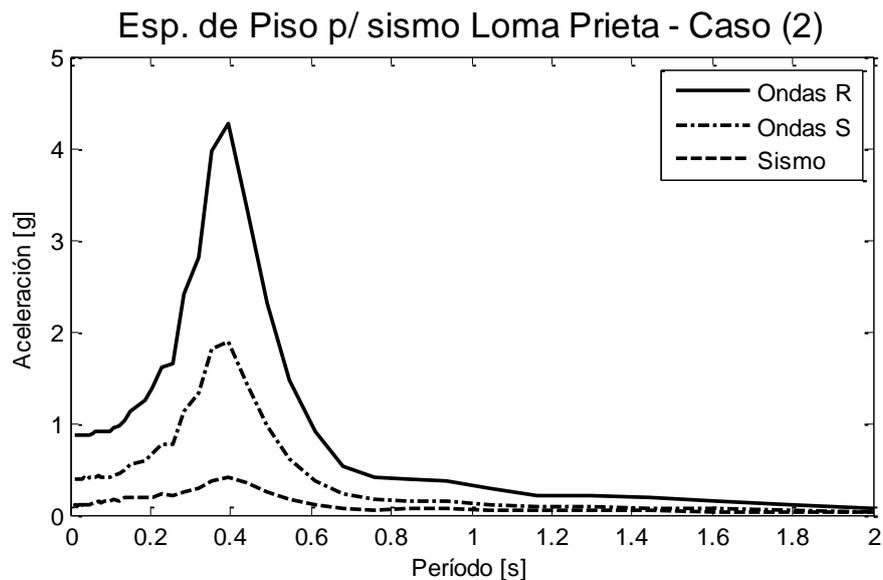


Figura 12. Espectros de piso de la aceleración horizontal (5% de amortiguamiento) en el extremo superior del edificio para el sismo de Loma Prieta, con fundación de 15m pero con la misma rigidez de la superestructura que para la fundación de 6 m

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos surge claramente que en el análisis de la respuesta de un sistema suelo-estructura como el representado con el modelo de análisis adoptado, la aceleración sísmica que resulta en la estructura varía notablemente en función del escenario sísmico que se adopte. Esa influencia se manifiesta tanto en las ordenadas de la función de transferencia de las aceleraciones de la estructura respecto al punto de control, como en los espectros de piso, y resulta tanto más notable cuanto más superficial es la fundación. De todos modos, también se manifiesta apreciablemente, aunque en menor medida, cuando la profundidad de la fundación es mayor.

Las principales causas de la influencia del tipo de escenario sísmico en las demandas sísmicas se originan en la rotación alrededor de un eje horizontal de la superficie del terreno asociada a las ondas tipo Rayleigh, efecto que es más notable cuanto más superficial es la fundación.

Si bien en general no se cuenta con predicciones precisas sobre la combinación más probable de ambos tipos de escenario sísmico aquí analizados, se concluye que en la verificación de instalaciones críticas a la seguridad no se debería descartar la influencia del escenario de cálculo en la predicción de las demandas sísmicas de diseño.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICET.

7. Referencias

[1] SUPER SASSI/PC Program (1995), "Complete Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis System on Personal Computers", Stevenson & Associates Inc.