

RESULTADOS DE UN ANÁLISIS SÍSMICO COMPUTACIONAL DEL EDIFICIO DEL SEGUNDO SUMIDERO DE CALOR DE LA CNAI CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN UN MODELO DINÁMICO ACOPLADO

NUMERICAL RESULTS OF A SEISMIC ANALYSIS OF THE SECONDARY HEAT SINK BUILDING OF ATUCHA I WITH A COUPLED SOIL STRUCTURE INTERACTION DYNAMICAL MODEL

Javier L. Raffo^a y Ahmad E. Guennam^a

^a*Grupo de Mecánica Computacional y Experimental, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, San Martín 1171, 2804 Campana, Argentina, jraffo@frd.utn.edu.ar, <http://www.frd.utn.edu.ar>*

Palabras Clave: Análisis Sísmico, Análisis Estructural, Interacción Suelo Estructura, Estructuras Civiles, Dinámica Estructural.

Resumen. Se presentan resultados numéricos de un modelo computacional correspondiente al edificio Segundo Sumidero de Calor reforzado, ubicado en la Central Nuclear Atucha I. El modelo se resuelve con el programa SASSI que permite obtener la respuesta dinámica del edificio ante excitaciones sísmicas, considerando efectos de la interacción suelo-estructura. El modelo incluye el sistema de pilotes de fundación, para lo que se utilizan, además de los elementos estructurales clásicos, elementos que modelan de manera efectiva la interacción de los pilotes con el suelo circundante y de los pilotes entre sí. Se obtiene la respuesta estructural y se presentan resultados de aceleraciones y esfuerzos internos ante la aplicación de un espectro sísmico que forma parte de los requerimientos de la Agencia Internacional de Energía Atómica que se encuentra especificado por fuera de la normativa nacional estándar vigente.

Keywords: Seismic Analysis, Structural Analysis, Soil-Structure Interaction, Building Structures, Structural Dynamics.

Abstract. Numerical results of a computational model of the reinforced Secondary Heat Sink Building of the Atucha I nuclear power plant. The model is solved with SASSI software that allows obtaining the dynamical response when a seism occurs with a coupled soil structure interaction model. This new numerical model also includes pile elements of the reinforced building that take into account the interactions between different piles and soil. The structural response spectra when the seism defined by International Atomic Energy Agency requirements occurs.

1 INTRODUCCIÓN

A partir de un requerimiento de la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina, especificado en la Fase 3 del Programa de Evaluación de la Seguridad Sísmica (Seismic Safety Evaluation Programme) el cual dictamina la necesidad de garantizar requisitos de seguridad ante eventos externos que se originaron luego del accidente de Fukushima Daiichi en Japón el 11 de marzo del 2011.

El informe realizado por [Johnson et al. \(2014\)](#) presenta el análisis sísmico del Edificio del Segundo Sumidero de Calor (SHS, siglas en inglés) a partir de un espectro de aceleración en cada dirección: dos espectros horizontales y uno vertical, realizado con la combinación de una serie de programas computacionales que incluye al programa CLASSI para tener en cuenta el efecto de interacción del suelo con la estructura (Soil Structure Interaction, SSI).

Nucleoeléctrica Argentina S. A. solicitó al Grupo de Mecánica Computacional de la UTN Fac. Reg. Delta que realice este estudio. Respondiendo al pedido, se utilizó parte del programa SASSI2010 desarrollado por [F. Ostadan y N. Deng \(2012a, 2012b\)](#), con el cual se puede analizar el problema de respuesta sísmica teniendo en cuenta la Interacción Suelo-Estructura. Este programa modela la estructura y el suelo con el método de elementos finitos y resuelve las ecuaciones de movimiento en el dominio de la frecuencia. Por otra parte, se utilizó el programa de elementos finitos multipropósitos desarrollado por el mismo grupo EFEMAS ([Guennam y Raffo, 2014](#)) y programas pre y post procesadores para complementar el estudio.

Mientras el uso del conjunto de programas CLASSI, GLAY y CLAM ([Johnson et al., 2014](#)) requiere la idealización de las fundaciones como rígidas, al usar SASSI2010 no es necesario introducir dicha hipótesis y se puede tener en cuenta un comportamiento más general de las fundaciones. Numerosos trabajos que consideran el efecto de interacción suelo-estructura en edificios de centrales nucleares ante eventos sísmicos presentan validaciones y comparaciones entre los nombrados programas ([Johnson et al., 2007](#); [Short et al., 2007](#); [Stewart et al., 2012](#)).

Como resultado de este estudio se presentan los espectros de respuesta de aceleraciones en diferentes puntos del Edificio del Segundo Sumidero de Calor Reforzado calculados con el programa SASSI2010. Para determinar algunas de las propiedades del suelo se definen valores de referencia a partir de los definidos en estudios previos ([Konno et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1998](#); [Prato et al., 1998](#); [Rodari et al., 2013](#)).

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

El cálculo computacional se realiza con el programa SASSI2010. El pre-procesamiento y pos-procesamiento fueron realizados con programas de desarrollo propio del Grupo de Mecánica Computacional y Experimental de la UTN, incluyendo al programa EFEMAS ([Guennam y Raffo, 2014](#)) que fue optimizado para generar el modelo de elementos finitos en el formato del programa SASSI2010 dado que el mismo no posee un preprocesador que facilite estudios paramétricos.

Para tener en cuenta la interacción entre el suelo y la estructura con el programa SASSI2010 se debe modelar, tanto la estructura analizada (incluyendo las fundaciones) como el suelo excavado (suelo removido para emplazar la fundación de la estructura). Un aspecto fundamental a introducir en el modelo corresponde a los nodos de interacción, que definirán la matriz de impedancia, a través de la cual se define la transmisión de movimiento e interacción sísmica suelo/estructura. Se debe observar que el suelo excavado y la estructura completa funcionan como sistemas acoplados que tendrán su correspondiente respuesta dinámica ante cualquier perturbación. A este sistema se le adicionan los elementos pilotes que poseen la

ventaja de no solo interactuar con el suelo circundante sino que tienen en cuenta los efectos dinámicos por perturbaciones causados entre ellos mismos.

En la [Figura 1](#) se observa el modelo computacional del edificio del Segundo Sumidero de Calor (SSC). Se observa el modelo de la superestructura y suelo excavado. Los resortes y masas representan el comportamiento dinámico del agua en las piletas superiores. El suelo es dividido en 8 capas de 1 m cada uno siendo el nivel inferior de los pilotes -8.5 m.

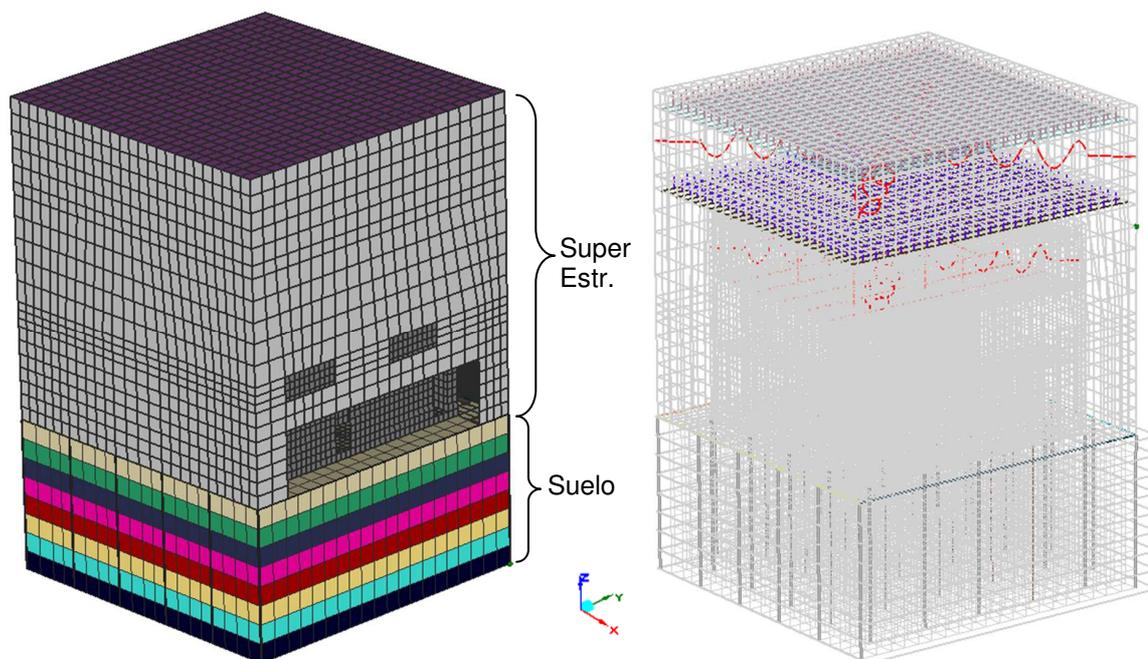


Figura 1: Modelos de elementos finitos del Edificio del Segundo Sumidero de Calor utilizado en el programa SASSI2010. Izq: Modelo de la superestructura y suelo excavado. Der: Estructura completa y suelo excavado en transparencia.

La malla de la estructura está compuesta por elementos de dos nodos para las vigas, elementos de 8 nodos para las cáscaras gruesas y lozas, los pilotes son elementos de vigas, los elementos sólidos son de 8 nodos y el agua es modelada con masas y resortes concentrados. Para tener en cuenta la rigidez del hormigón junto con los refuerzos de acero (armadura) de la estructura, se aumentó un 15% al módulo de Young del hormigón (29487242 kN/m²) y se lo consideró material lineal homogéneo para el análisis.

En cuanto al modelo del suelo, además de la malla con elementos sólidos de 8 nodos se incluyeron las velocidades de propagación de ondas de presión y corte, amortiguamiento y densidad. Los valores de las propiedades especificados fueron utilizados y mantenidos fijos, mientras que para los parámetros no especificados, se utilizaron valores de referencia definidos en estudios previos ([Konno et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1998](#); [Prato et al., 1998](#); [Rodari et al., 2013](#)).

El espectro de excitación sísmica se especifica en la superficie del suelo ($z=0$ m) dado que está relacionado con el punto de referencia (medición) de aceleraciones.

El método utilizado para obtener la matriz de impedancia en los nodos de interacción entre el suelo y la estructura es el Método Directo de Volumen Flexible que implementa el programa SASSI2010 (Direct Flexible Volume Method) desarrollado por [F. Ostadan y N. Deng \(2012a, 2012b\)](#).

La discretización de la malla de elementos finitos del suelo, columnas y el resto de la estructura está verificada para captar las diferentes frecuencias de aceleración del sismo de entrada.

3 PROPIEDADES DEL SUELO

El suelo se consideró dividido en siete capas sobre una última capa llamada semi-espacio infinito (halfspace). Para modelar este último, se considera que tiene las mismas propiedades que la última capa de suelo. En la [Tabla 1](#) se presentan las capas con sus correspondientes espesores y en la [Figura 2](#) se presentan las velocidades de propagación de onda de corte de los puntos considerados en el modelo que fueron especificados según la información disponible en [Johnson et al. \(2014\)](#).

Capa de Suelo	z	V_s
1	0	228
	-13	228
2	-13	260
	-20	260
3	-20	281
	-26	281
4	-26	307
	-33	307
5	-33	344
	-41	344
6	-41	417
	-50	417
7	-50	480
	-55	480
Sub espacio	-55	480
	$-\infty$	480

Tabla 1: Capas del suelo y sus correspondientes velocidades de propagación de onda de corte.

Se consideraron las siguientes propiedades del suelo definidos en estudios previos ([Konno et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1998](#); [Prato et al., 1998](#); [Rodari et al., 2013](#)): Peso específico del suelo, 19 kN; Coeficiente de Poisson del suelo, 0.35; Amortiguamiento de ondas de corte, 0.05; Amortiguamiento de ondas de presión, 0.05.

4 CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA

El punto de referencia de la excitación sísmica se lo considera ubicado en la superficie del suelo ($z=0$ m). El sismo se introduce como aceleraciones relativas a la gravedad, g , en función de la frecuencia, f (espectro de aceleraciones). El sismo de entrada es el correspondiente al presentado por [Johnson et al. \(2014\)](#) y aprobado por el ARN (Autoridad Regulatoria Nacional) para la zona de Atucha I. El mismo se presenta en la [Figura 3](#). Este espectro es aplicado en las tres direcciones cartesianas (x , y , z) del modelo que se indican en la [Figura 1](#).

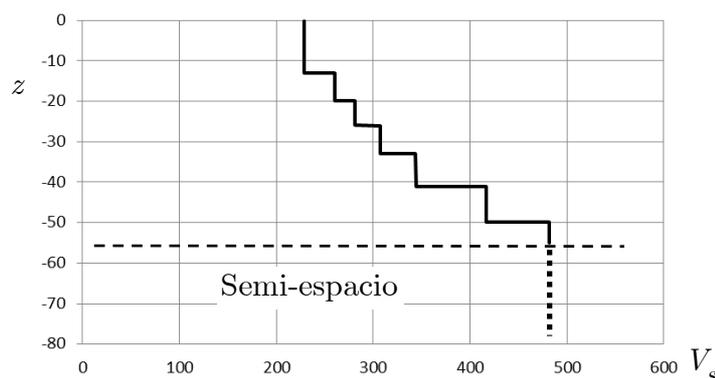


Figura 2: Velocidad de propagación de la onda de corte en función de la profundidad.

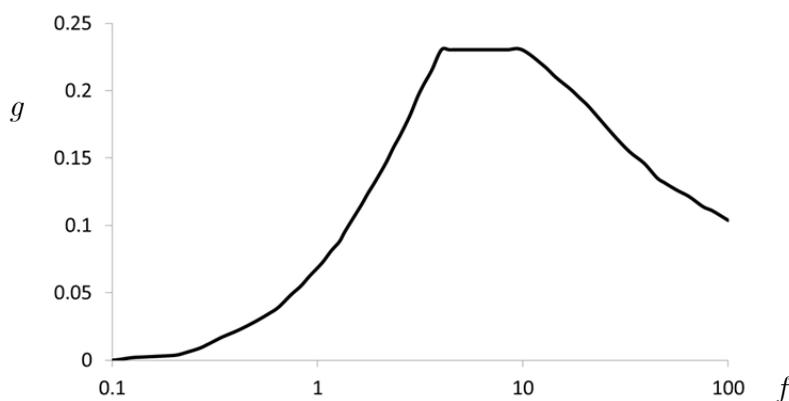


Figura 3: Espectro de aceleraciones utilizado por Johnson et al. (2014).

5 RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIONES

Se presenta la respuesta en frecuencia de la aceleración resultante causada por el espectro de aceleración sísmica de la Figura 3 en los cuatro nodos indicados en la Tabla 2 e indicados en la Figura 4.

Nodo	x	y	z
1662	13.3	13.4	-0.35
14105	15	15.25	12.42
14585	15	15.25	16.87
15489	5.84	6.70	16.87

Tabla 2: Coordenadas de los nodos del edificio SSC donde se presentan las respuestas de aceleración espectral.

En la Figura 5, 6 y 7 se presentan los espectros de aceleración resultantes en las direcciones X, Y y Z respectivamente. A fines demostrativo, en los resultados del nodo 1662 se presentan los obtenidos originalmente por Johnson et al. (2014) donde el cimiento fue considerado plano y rígido en las direcciones X e Y y no se incluye el edificio de refuerzo exterior, los del edificio sin reforzar y sin pilotes obtenidos con SASSI2010 y en tercer lugar los del modelo actual teniendo en cuenta el agua en las piletas obtenidos también con SASSI2010. Se destaca que solo se presentan resultados en 4 nodos para no ser excesivos con los resultados presentados.

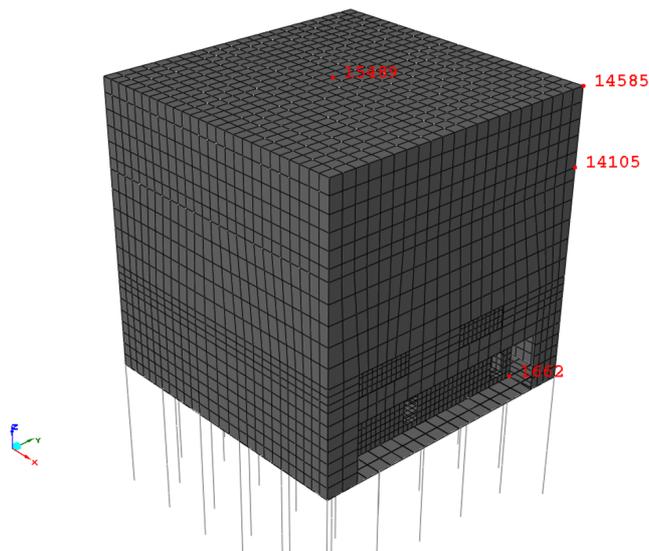


Figura 4: Ubicación de los nodos donde se presentan los espectros de aceleración resultantes.

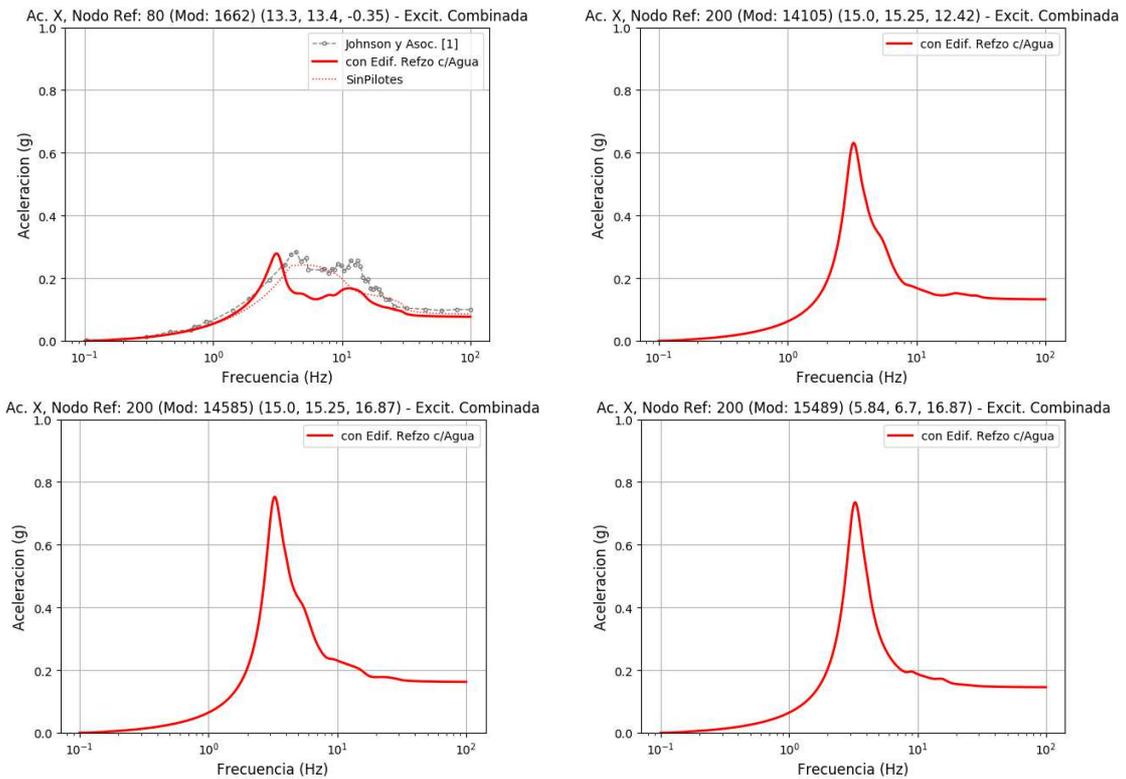


Figura 5: Espectro de aceleración resultante en dirección X. En el nodo 1662 se agregan los resultados de [Johnson et al. \(2014\)](#) y del modelo sin pilotes y sin el edificio de refuerzo como valores de referencia.

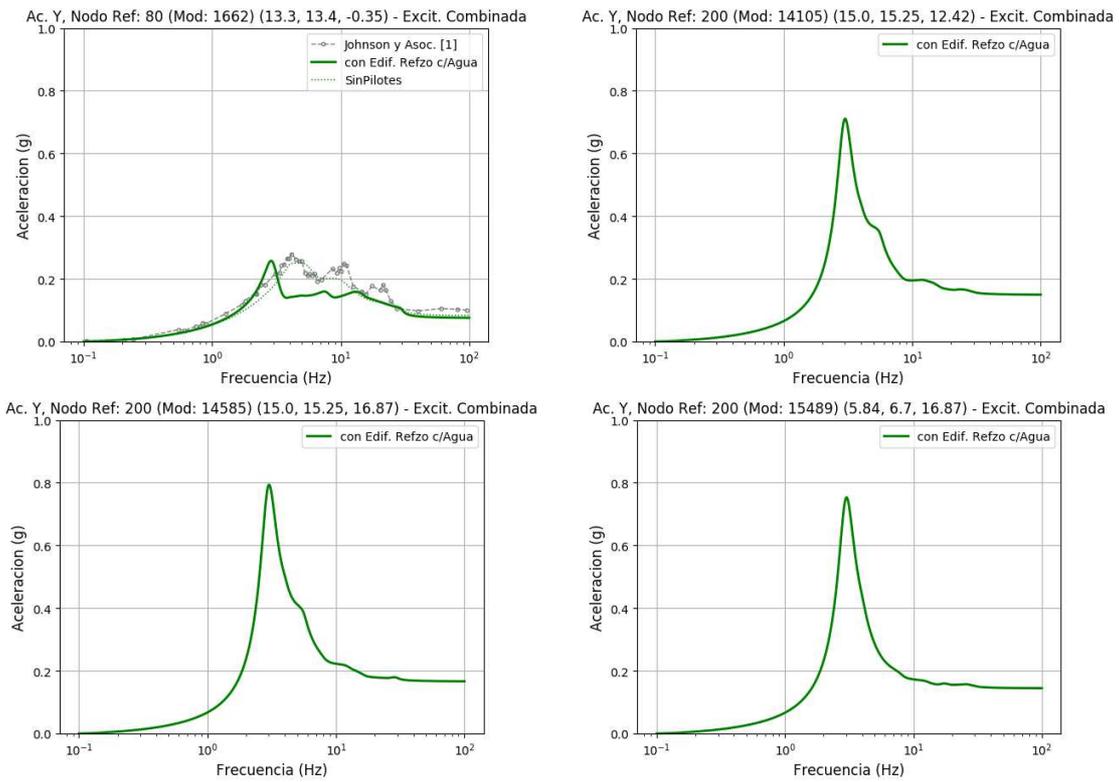


Figura 6: Espectro de aceleración resultante en dirección Y. En el nodo 1662 se agregan los resultados de Johnson et al. (2014) y del modelo sin pilotes y sin el edificio de refuerzo como valores de referencia.

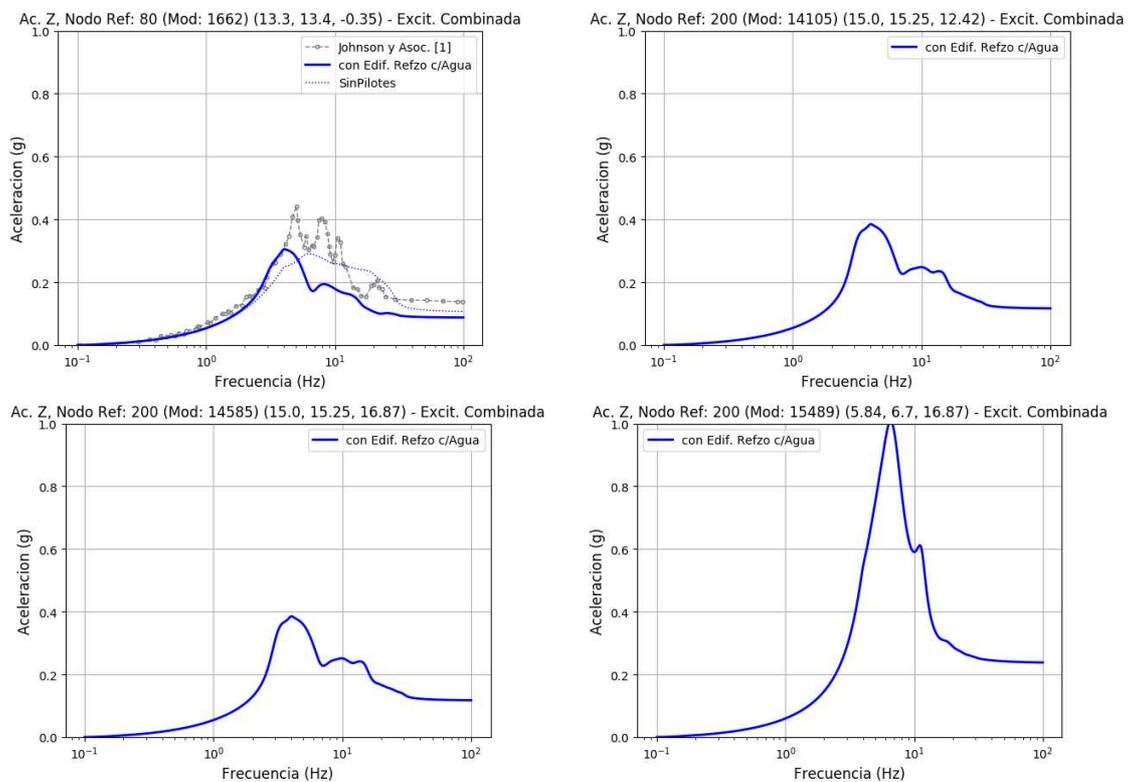


Figura 7: Espectro de aceleración resultante en dirección Z. En el nodo 1662 se agregan los resultados de Johnson et al. (2014) y del modelo sin pilotes y sin el edificio de refuerzo como valores de referencia.

Se observa que al comparar la respuesta del edificio reforzado y sin reforzar a nivel del suelo, por la diferencia de rigidez y mas, el edificio reforzado con pilotes presenta una disminución en las aceleraciones a partir de aproximadamente los 4 Hz en todas las direcciones. Por otra parte, a medida que se asciende en Z, la respuesta en aceleración aumenta como es de esperarse.

6 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de respuesta sísmica del edificio del Segundo Sumidero de Calor de la CNAI teniendo en cuenta la interacción suelo/estructura y se obtuvo el espectro de aceleraciones en diferentes puntos del mismo.

Se presentaron los resultados de la respuesta sísmica de dos modelos del edificio considerando el edificio original sin reforzar y sin pilotes con el edificio reforzado con pilotes utilizando las propiedades de suelo definidas en trabajos previos (Konno et al., 1995; Ceballos et al., 1995; Ceballos et al., 1998; Prato et al., 1998; Rodari et al., 2013) y se los comparó con los resultados de Johnson et al. (2014).

Los resultados muestran una excelente coherencia en la respuesta sísmica si se observa la ubicación de los nodos de la estructura.

Se debe tener en cuenta que las diferencias observadas entre los resultados presentados por Johnson et al. (2014) y los del presente trabajo pueden deberse a que en el primero se utilizó el programa CLASSI que realiza el cálculo de respuesta sísmica considerando a la estructura con una base plana rígida mientras el SASSI relaja esta hipótesis restrictiva.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Nucleoeléctrica Argentina S. A. por el estudio solicitado y permitir la publicación del mismo. Este trabajo fue realizado en la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional dentro de los proyectos UTN 4417 y 5144.

REFERENCIAS

- Ceballos M. A., Car E. J., Prato T. A., Prato C. A. and Alvarez L. M., Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, *Nuclear Engineering and Design*, 182:93-106, 1998.
- Ceballos M. A., Car E. J., Prato T. A., Prato C. A., Alvarez L. M. and Godoy A. R., Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, *Proceeding of SMiRT 13*, 311-327, 1995.
- Guennam A. E. y Raffo J. L. Programa EFE+ (EFEMAS) de Elementos Finitos., Grupo de Mecánica Computacional, Fac. Reg. Delta, UTN. Web del programa y solver www.efemas.com, 2014.
- Johnson J. J. and Associates, *Seismic Safety Evaluation Programme of the Atucha I NPP (CNAI) – Argentina. Phase 3 – Seismic Dynamic Response of Building Structures and In-Structure Response Spectra Calculations. Volume II.1: CNAI General Approach and CNAI Secondary Heat Sink Building (SHSB)*, Presented to: Nucleoeléctrica Argentina S. A., 180 pages, 2013.
- Johnson J. J., Short S. A. and Hardy G. S., Modeling Seismic Incoherence Effects on NNP Structures: Unifying CLASSI and SASSI Approches, *Transactions SMiRT 19*, paper K05/5, 2007.
- Konno T., Uchiyama S., Alvarez L. M., Godoy A. R., Ceballos M. A. and Prato C. A., Full Scale Dynamic Test of Atucha II NPP, International Nuclear Information System IAEA,

- Proceeding of SMiRT 13*, 289-309, 1995.
- Ostadan, F. and Deng, N., *SASSI 2010 User's Manual: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, University of California at Berkeley CA., 2012a.
- Ostadan, F. and Deng, N., *SASSI 2010 Theoretical Manual: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, University of California at Berkeley CA., 2012b.
- Prato C. A., Konno T., Uchiyama S., Alvarez L. M., Godoy A. R. and Ceballos M. A., Full Scale Dynamic Test of Atucha II NPP, *Nuclear Engineering and Design*, 179:225-243, 1998.
- Rodari R., Zabala F. and Navarta G., Generation of Floor Response Spectra for Atucha II NPP, *Proceeding of SMiRT-22*, 10 pages., 2013.
- Short S., Hardy G., Merz K., Johnson J. J., Program on Technology Innovation: Validation of CLASSI and SASSI Codes to Treat Seismic Wave Incoherence in Soil-Structure Interaction (SSI) Analysis of Nuclear Power Plant Structures, *Electrical Power Research Institute Report*, 1015111, Palo Alto, CA, 2007.
- Stewart J., Crouse C.B., Hutchinson T. C., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F., Soil-Structure Interaction for Building Structures, *National Institute of Standards and Technology*, 12-917-21, 2012.