

Efecto de la variabilidad de la rigidez del sitio de fundación en el desempeño sísmico

Effect of the foundation site stiffness variability on the seismic performance

Fecha de entrega: 30 de noviembre 2016

Fecha de aceptación: 18 de agosto 2017

Franco Benedetti, Fernando Zúñiga y Alexander Opazo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Avda. Collao 1202, Concepción, Chile, fbenedetti@ubiobio.cl, fezuniga@alumnos.ubiobio.cl, aopazove@ubiobio.cl

La mayoría de normas de diseño estructural clasifican los sitios de fundación a través de la rigidez media que presenta el suelo, obtenida a partir de la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros treinta metros V_{s30} . Al tratarse de un promedio, la clasificación no considera directamente las características de los estratos cercanos a la fundación, ni que sitios con distinta configuración de rigideces son clasificados como un mismo tipo. Por otra parte, tampoco hay indicaciones claras respecto de la forma en que esto podría afectar la respuesta estructural. Este trabajo busca establecer si la distribución de la rigidez del suelo de fundación afecta el desempeño sísmico de las estructuras mediante modelos numéricos en OpenSees. Bajo un enfoque de análisis directo bidimensional, la estructura es modelada con una constitutiva elastoplástica. El suelo se representa por elementos no lineales sensibles a la presión de confinamiento. La interfaz suelo-fundación se modela con elementos de contacto que permiten el deslizamiento y balanceo de la fundación. Se someten distintas estructuras (con períodos entre 0.3 a 1.2 s), a análisis dinámicos con registros sísmicos de diferentes contenidos de frecuencia y amplitudes. Los resultados muestran que existen diferencias significativas en la respuesta estructural entre sitios clasificados como un mismo tipo, pero con distinta configuración de rigideces, especialmente cuando la estructura se mantiene en el rango lineal, lo que sugiere que la clasificación sísmica de sitios de fundación en base a un indicador medio podría subestimar los efectos de acoplamiento dinámico del sistema suelo-fundación-estructura.

Palabras claves: interacción suelo-fundación-estructura, desempeño sísmico, clasificación de sitios de fundación, OpenSees

In most of the structural design codes, the foundation sites are classified through the mean stiffness of the soil profile, obtained on the basis of the mean shear wave velocity of the upper 30 m V_{s30} . Because it is an averaged index, the site classification does not directly take into account the properties of shallower soil layers, neither the fact that sites with different soil stiffness distribution are classified as the same site class. Moreover, the way in how this situation can affect the response of the structures is not clearly specified. In this work, the effect of the site stiffness distribution on the seismic performance and level of damage of structures is explored by means of numerical models. Under a direct approach, two-dimensional numerical models are developed on OpenSees, where the structure has a nonlinear elastoplastic constitutive law. The soil is represented by nonlinear elements sensitive to confinement pressure. The soil-foundation interface is modeled with contact elements allowing the sliding and rocking of the foundation. Different structures (with periods between 0.3 to 1.2 s) are subjected to dynamic analyses using seismic records of different frequency content and amplitudes. The results show significant differences on the structural response among sites of the same class, but with different stiffness distribution, particularly when the structure remains on the elastic range, suggesting that the classification of foundation sites through an average index can underestimate the effects of the dynamic coupling of the soil, the foundation and the structure.

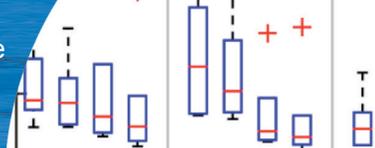
Keywords: soil-foundation-structure interaction, seismic performance, foundation site classification, OpenSees

Introducción

En el diseño y análisis de una estructura, se consideran una serie de supuestos con el fin de simplificar y disminuir el tiempo y costo del estudio. En particular, al realizar el análisis del sitio de fundación, se realizan simplificaciones que a veces están alejadas del comportamiento que se exhibe en la realidad. Por ejemplo, la NCh 433 (2009) no considera el hecho que el movimiento provocado por un sismo en una superficie de terreno sin estructura (campo libre) es diferente al movimiento del mismo sitio con estructura, o dicho de otra manera, la presencia de la estructura modifica el movimiento, lo que se conoce como interacción suelo-estructura. La interacción suelo – fundación – estructura (SFSI, por sus siglas en inglés) actúa sobre el comportamiento de la estructura de dos formas (Kausel, 1976; Stewart *et al.*, 1999). La primera es modificando las características dinámicas del sistema estructural, alargando el período fundamental y aumentando el amortiguamiento. El otro efecto tiene relación con el acoplamiento de movimiento sísmico entre el suelo flexible y la fundación rígida, y con la diferencia entre la demanda sísmica a nivel de fundación respecto de la demanda en campo libre. Estos fenómenos son considerados generalmente beneficiosos en los pocos códigos de diseño que incorporan la SFSI, por ejemplo ATC (2005) y ECS (2004). Esto debido a que un aumento del período fundamental implicaría que la estructura pasaría a una zona del espectro de diseño con menos demanda, lo que no es cierto en el caso de estructuras muy rígidas fundadas en suelo blando, y que por otro lado un aumento del amortiguamiento reduce todo el espectro de respuesta. Si bien en la actualidad no hay consenso absoluto acerca de si la SFSI es beneficiosa o no (Ghannad y Jafarieh, 2014; Moghaddasi *et al.*, 2011; Mylonakis y Gazetas, 2000), algunos autores postulan una nueva forma de diseñar empleando este fenómeno de manera de proteger a las estructuras del daño sísmico (Anastasopoulos *et al.*, 2010). Por otro lado, en numerosas observaciones ha quedado demostrado que los daños ocasionados por un sismo son, en general, mayores en la superficie de depósitos de suelo blando que sobre afloramientos rocosos. Los depósitos de suelo, debido a sus características físicas

(rigidez, densidad, etc.) distintas a la roca, pueden influenciar de manera significativa la amplitud, el contenido de frecuencia y la duración del movimiento de superficie. Esta es la principal razón que para un mismo evento sísmico estructuras de características similares, equidistantes a la zona de ruptura, pero fundadas en sitios diferentes, puedan tener un desempeño estructural muy distinto.

En la actualidad, la mayoría de las normas de diseño estructural en el mundo incorporan los efectos de sitio clasificando los sitios de fundación a través de un promedio ponderado de las ondas de corte en los primeros 30 m (ASCE, 2010; BSSC, 2003; ECS, 2004; entre otros). En Chile, el decreto supremo 61 (MINVU, 2011) declara que “la clasificación sísmica de suelos depende principalmente de la velocidad de ondas de corte promedio de los 30 metros superiores del terreno, V_{s30} ”. Esta es la principal manera que tienen los códigos para incorporar, de manera simplificada, el fenómeno de respuesta de sitio en el diseño estructural. Sin embargo, no se consideran ciertos fenómenos que pueden cobrar relevancia en eventos sísmicos importantes y que podrían modificar el desempeño estructural. Por ejemplo, la clasificación se define en función de un parámetro (rigidez) que describe el comportamiento elástico-lineal de un suelo, aun cuando este comportamiento en sismos de gran magnitud y en las vecindades de la estructura pudiese ser mejor representado como no-lineal e inelástico. El concepto de los primeros 30 m es ampliamente utilizado para la zonificación sísmica teniendo en cuenta los datos experimentales de la geotecnia y las pruebas geofísicas. Por ejemplo, Joyner y Boore (1993) basan sus regresiones en la velocidad media de ondas de corte en los primeros 30 m, mientras que Borchardt (1994) y Dobry *et al.* (1992) también sugieren basar el diseño en estas propiedades. No obstante lo anterior, las normas no especifican si existe algún efecto en el comportamiento estructural cuando sitios con distinta configuración de rigideces clasifican como un mismo tipo. Esta última situación es la que será evaluada en esta investigación mediante el uso de modelos numéricos no lineales, los que consideran también el fenómeno de interacción suelo – fundación – estructura. A través de estos



sistemas se estudian los efectos que pueden influenciar significativamente el comportamiento de estructuras fundadas en sitios de igual clasificación de diseño, pero distinta distribución de rigideces, cuando son sometidas a demandas sísmicas elevadas. Los modelos se desarrollan en OpenSEES (Mazzoni *et al.*, 2006), un software de código abierto altamente validado y muy utilizado para investigación en el campo de la ingeniería sísmica. Los resultados sugieren que la distribución estratigráfica de los sitios de fundación puede tener un efecto en el comportamiento sísmico de las estructuras, y que por lo tanto, debería ser incorporado de forma más rigurosa en el diseño estructural.

Metodología

Las estructuras modeladas representan simplificada-mente edificios simétricos, regulares, con losas que desarrollan la función de diafragma rígido, con la masa total distribuida de manera equitativa y aplicada al nivel de cada piso. Este tipo de construcciones tiene como modo predominante de vibración el traslacional, por lo que es posible representarlas de forma idealizada como sistemas de un grado de libertad. El sistema modelado está empotrado en una losa de fundación muy rígida y sin confinamiento, la cual se conecta al suelo de forma que se permita la interacción cinemática e inercial, pudiendo desarrollar no-linealidades como el deslizamiento y el levantamiento de la estructura. Es importante mencionar que la estructura y el suelo se definieron de manera que tuvieran un comportamiento de tipo no lineal, mientras que la fundación se definió para representar un comportamiento elástico lineal. Luego de definir las propiedades del suelo, se aplica al modelo una serie de registros sísmicos con distintas amplitudes, duraciones y contenidos de frecuencia, con el fin de incorporar la aleatoriedad de la demanda. El dominio de análisis consta de estructuras con distintos períodos y con distintos anchos de fundación, con el fin de abarcar variadas configuraciones estructurales. En las secciones siguientes se explican de manera detallada los procedimientos, casos estudiados y consideraciones realizadas.

Dominio de estructura y fundación

Los períodos fundamentales de las estructuras seleccionadas para este estudio fueron 0.3, 0.7 y 1.2 s, los que permiten considerar estructuras de distintas características dinámicas. La altura de cada estructura se estima según la relación propuesta por Lagos *et al.* (2012) para edificios chilenos de rigidez normal, la que establece que la razón entre la altura de la estructura y el período del primer modo de vibrar es igual a 70. Respecto al tamaño de la fundación, se seleccionaron seis anchos distintos compatibles con el supuesto de losa de fundación. Un resumen de las distintas combinaciones de variables se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Dominio de variables del modelo de la estructura

Modelo	Estructura 1	Estructura 2	Estructura 3
Período T , s	0.3	0.7	1.2
Ancho de fundación B , m	9, 12, 17, 20, 23, 26	9, 12, 17, 20, 23, 26	9, 12, 17, 20, 23, 26

Propiedades del sistema estructural

La capacidad de la estructura está caracterizada como elastoplástica, donde la fluencia comienza para un desplazamiento lateral del techo igual a 0.002 veces la altura (*drift* lateral), lo que corresponde al término del nivel de desempeño operacional establecido por SEAOC (1995) para estructuras de hormigón armado. Para considerar el efecto de la resistencia de la estructura en el fenómeno, se establecieron tres niveles de capacidad: 0.1, 0.2 y 0.4g. Para todas las estructuras se considera la misma masa de 8000 ton. La razón de considerar solo un valor fue para independizar el sistema de esta variable y simplificar el problema. Respecto del vínculo entre la fundación y el suelo, se considera una interfaz de contacto que permite el desarrollo de efectos de levantamiento y deslizamiento (Gazetas y Apostolou, 2004; Zhang y Zhang, 2009).

Sitios de fundación

Para esta investigación se modela el suelo como un depósito de arena en condición drenada y los sitios analizados poseen un $V_{s30} = 250$ m/s, clasificando

como suelo D según decreto DS 61 (MINVU, 2011). Se consideraron cuatro sitios para el análisis, cada uno con distinta distribución de rigideces en los primeros 30 m de profundidad. Las distribuciones o estratos considerados se muestran en la Figura 1.

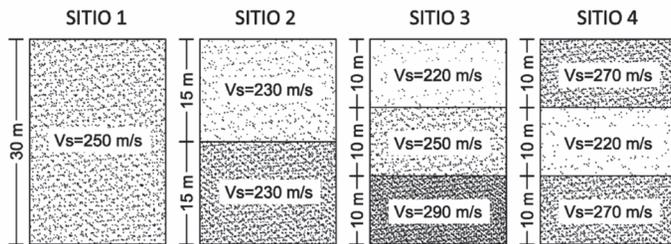


Figura 1: Sitios utilizados para el análisis

Con respecto a la malla de elementos finitos del modelo del suelo, se considera un dominio de al menos 5 veces el tamaño de la fundación en su dimensión horizontal, y de 30 m de profundidad. El MEF del suelo se subdivide en elementos de 4 nodos estabilizados de un solo punto de integración, elementos SSP (McGann *et al.*, 2012) considerando que el tamaño máximo debe permitir la correcta transmisión de las ondas a través del medio, es decir, que la máxima longitud de ondas para una frecuencia de 15 Hz (Jeremić *et al.*, 2009) traspase al menos 10 nodos del modelo. Además, se dispone de refinado adicional en la zona del suelo bajo la fundación para favorecer la adecuada transmisión del gradiente de tensiones (Kausel, 1976). Para disminuir los efectos de las condiciones de borde, se dispone de una frontera absorbente de amortiguadores viscosos según lo propuesto por Lysmer y Kuhlemeyer (1969). El comportamiento tensión-deformación del suelo es modelado según la ley constitutiva propuesta por Elgamal *et al.* (2002). Los parámetros empleados se muestran en la Tabla 2, los que se ajustan al rango de valores establecidos para el dominio del modelo constitutivo empleado (Yang *et al.*, 2008), donde V_s es la velocidad de ondas de corte, γ es el peso unitario, ϕ es el ángulo de fricción, G_{max} es el módulo de corte para pequeñas deformaciones, K_{max} es el módulo de compresibilidad de referencia para pequeñas deformaciones, $e_{inicial}$ es la razón de vacíos inicial y ν es la razón de Poisson.

Tabla 2: Parámetros elásticos para definir los suelos

V_s , m/s	220	230	250	270	290
γ , kN/m ³	17	17.5	18	19	21
ϕ , °	29	30	32	34	36.5
G_{max} , MPa	55.1	65.0	87.1	110.1	131.2
K_{max} , MPa	257.0	325.0	406.5	507.5	612.5
$e_{inicial}$	0.7	0.65	0.6	0.58	0.55
ν	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Demanda sísmica

Se utilizaron seis registros sísmicos con el propósito de representar la naturaleza estocástica de la demanda en términos de amplitud, contenido de frecuencia y duración. Los valores de PGA varían entre 0.35g hasta 0.57g, y la máxima duración efectiva es de 20 s. Las demandas empleadas tanto a registros de terremotos reales como 2 registros compatibles con el espectro elástico para suelo tipo D propuesto por el código de diseño sísmico chileno (MINVU, 2011). La Figura 2 muestra los espectros de respuesta de los sismos estudiados. En el espectro de aceleración puede observarse como la energía se concentra principalmente entre los períodos 0 a 1.5 s, además de que los espectros sintéticos de los registros artificiales compatibles con espectro de diseño suelo D del código chileno (NCh 433 D1 y D2) prácticamente envuelven a los otros espectro en el rango de 0 a 2 s. A los modelos numéricos, la demanda sísmica es aplicada según los principios del método de reducción del dominio (Bielak *et al.*, 2003; Yoshimura *et al.*, 2003).

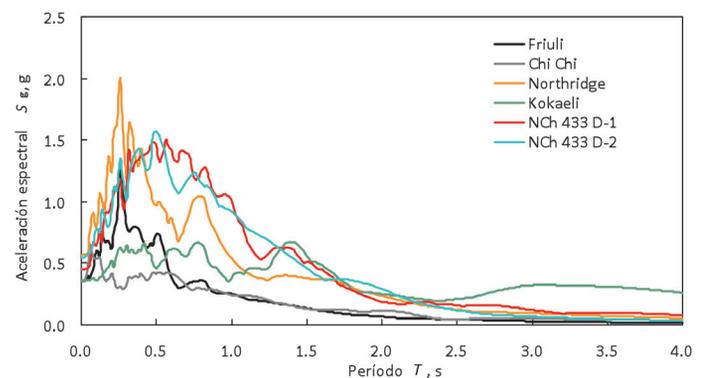


Figura 2: Espectros de respuesta de aceleración para los sismos modelados

Resultados

Desempeño según sitio de fundación

La Figura 3 muestra la distribución de la razón entre el desplazamiento lateral máximo del techo y la altura o *drift* para el sistema estructural con período 0.3 s en función del ancho de fundación (o ancho de base), para los distintos sitios y capacidades estudiados. En los ejes horizontales se encuentran los sitios y el ancho de base, mientras que en los ejes verticales están el *drift* y las capacidades. Todos los resultados están resumidos en diagramas de cajas, por lo tanto los rectángulos azules corresponde al rango que concentra el 50% central de los datos (entre cuartil 2 y cuartil 3), la línea roja es la mediana, la línea discontinua muestra los cuartiles extremos (cuartil 1 y cuartil 4), y las cruces rojas muestran puntos atípicos ubicados fuera del rango establecido por la media y dos desviaciones estándar.

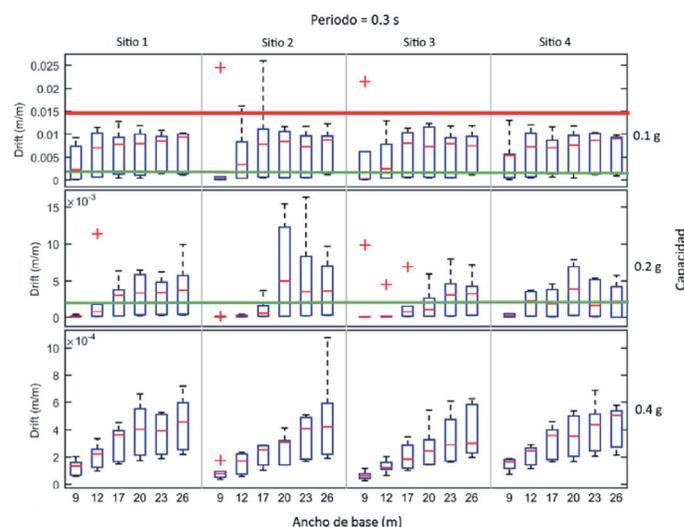


Figura 3: Distribución de drift según sitio para período de 0.3 s

La línea horizontal verde indica el *drift* de fluencia de 0.2%, el que para el caso de la capacidad 0.1g es sobrepasado por más del 50% de los datos, incluso algunos sobrepasan la línea horizontal roja de seguridad de la vida de 1.5%. La capacidad 0.2g también tiene una cantidad importante de sismos que incursionan en el rango no lineal por sobre línea verde, especialmente en los anchos de fundación mayor a 17 m, pero menos casos que la capacidad 0.1g. La capacidad 0.4g mantiene todos sus puntos en el rango lineal. Se puede observar que en las capacidades 0.2g

y 0.4g existe una tendencia creciente, donde los datos del *drift* aumentan su mediana y dispersión a medida que aumenta el ancho de base. En la capacidad 0.1g no hay una tendencia clara de la mediana ni de la dispersión de los datos, lo que puede deberse a la gran incursión en el rango no lineal que tienen estas estructuras. En la Figura 4 muestra la distribución del máximo giro de fundación en función de la capacidad estructural, del sitio de fundación y del ancho de base para el período 0.3 s. Para la capacidad 0.1g se aprecia una tendencia decreciente, tanto en la mediana como en la dispersión de los datos, a medida que aumenta el ancho de fundación. Esta tendencia es menos pronunciada a medida que aumenta la capacidad. Además, a medida que aumenta la capacidad se aprecia un aumento de la magnitud del giro.

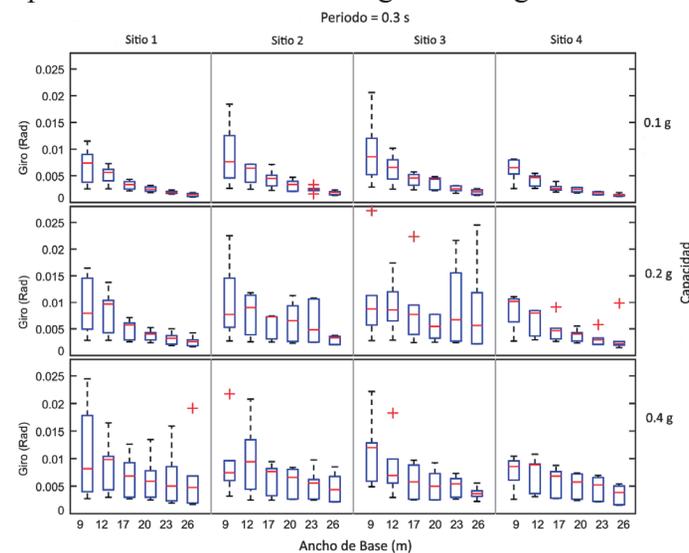


Figura 4: Distribución del giro de fundación según sitio, para período 0.3 s

En general, no se observa una clara influencia de los sitios de fundación en la respuesta del sistema fundación-estructura en los casos en que la respuesta del sistema estructural es altamente no lineal, pero se tiene que hay una mayor magnitud en el giro para las estructuras fundadas en los sitios 2 y 3 y una disminución en el *drift*, donde los suelos superficiales son más blandos, en particular para los anchos de fundación menores y la respuesta estructural está en el rango elástico.

Para las estructuras con períodos 0.7 s y 1.2 s, la Figura 5 muestra nuevamente el *drift* en función del

ancho de base, el sitio de fundación y la capacidad. Debido a las características de la demanda, existen pocos datos que incursionan en el rango no-lineal y los que lo hacen se encuentran principalmente en la menor capacidad de 0.1g. Se aprecia una tendencia creciente del *drift* en ambos periodos a medida que aumenta el ancho de base.

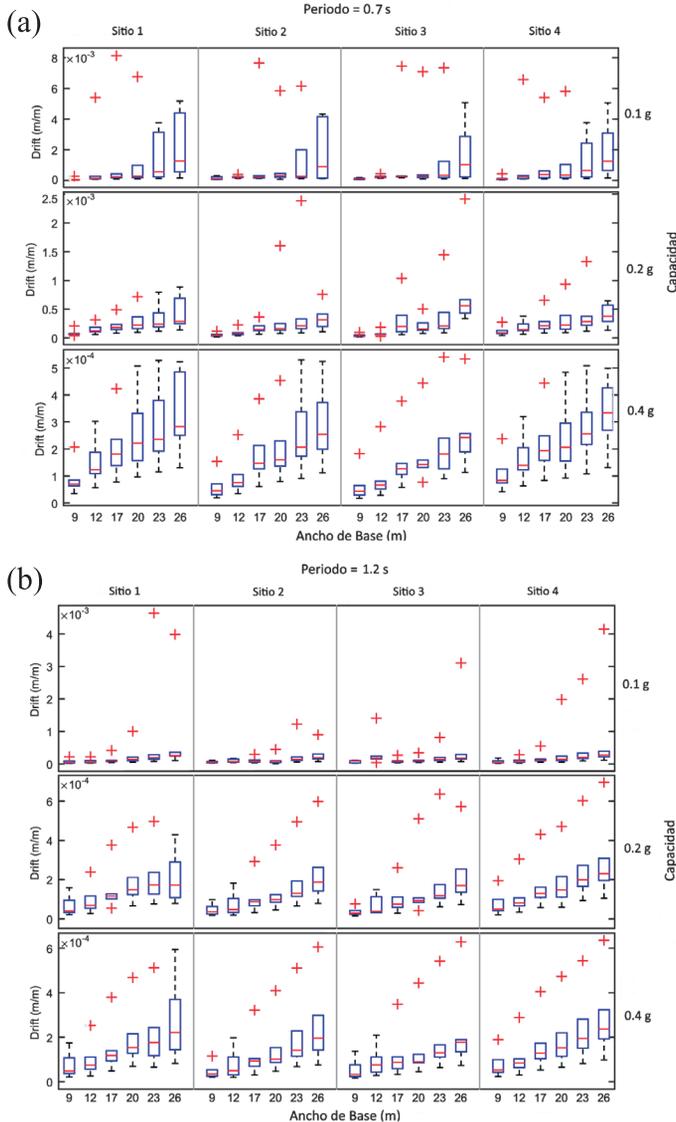


Figura 5: Distribución de drift según sitio para: a) período 0.7 s y b) período 1.2 s

Se observa que en el sitio de fundación en que se dispone del estrato de menor rigidez en contacto con la fundación (sitio 3), la mediana y la dispersión de los *drift* máximos es menor que en los sitios con el estrato superior del depósito con mayor rigidez, particularmente en los casos con mayor capacidad estructural.

Es importante destacar que con el aumento del período de la estructura aparecen una cantidad importante de puntos atípicos, los cuales son producidos principalmente por el registro sísmico de mayor duración efectiva de los considerados en el estudio. Para observar en cuál de los sitios es más relevante el desempeño sísmico el ancho de fundación se utiliza la prueba estadística de Wilcoxon (Conover, 1998). Se opta por esta prueba ya que los datos se trataron como independientes y es menos sensible al supuesto de que éstos provienen de una distribución normal, contrario a lo que ocurre en las pruebas paramétricas. La Figura 6 muestra una gráfica con los resultados de la prueba estadística. Los cuadros blancos indican los casos en que no hay evidencia estadística suficiente para concluir que las respuestas de los sistemas comparados son distintas. Por otro lado, los cuadros verdes indican que existe diferencia estadística significativa entre los grupos comparados, ya que los valores están por debajo del valor de significancia dado como 0.05 ($p < 0.05$). En el eje horizontal se muestran los sitios y las capacidades.

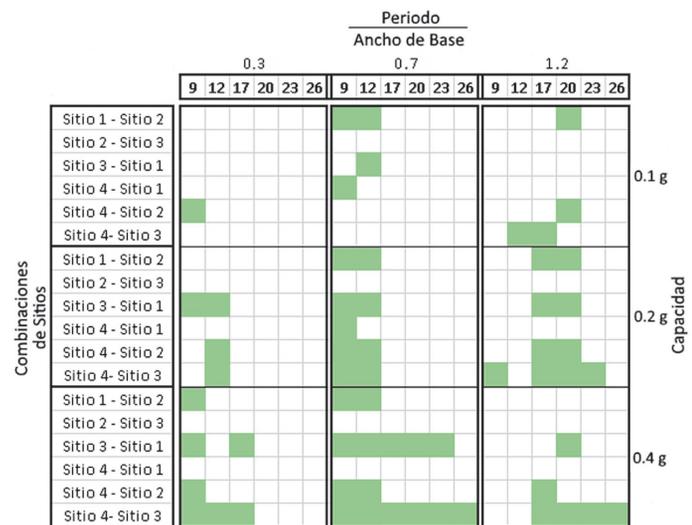


Figura 6: Diferencias estadísticamente significativas entre sitios de fundación.

Se observa que la distribución de la rigidez en los estratos de suelo se hace relevante, es decir, que modifica significativamente el desempeño estructural para las estructuras de períodos fundamentales altos con elevada capacidad. En los rangos de las fundaciones de menor tamaño se observa una diferencia estadísticamente suficiente,

particularmente entre los sitios en donde el suelo en contacto con la fundación es más blando (sitios 2 y 3), con respecto al sitio en que el suelo superficial es el más rígido (sitio 4). Por otra parte, en las estructuras de menor capacidad, en donde la respuesta incursiona en el rango no lineal, la distribución de la rigidez del suelo se hace menos importante en términos de los cambios en nivel de daño o desempeño estructural, aunque se aprecia que para las fundaciones de menor tamaño, pudiera ser un fenómeno relevante.

Desempeño estructural según ancho de fundación

Como se indicó anteriormente, las variaciones de desempeño de las estructuras se presentan concentradas en los casos donde la fundación es de menor tamaño, por lo que ésta es una variable que controla el efecto del suelo en la estructura. Para analizar estos efectos se define el indicador V_s equivalente a la base $V_s B$, el cual consiste en el cálculo de velocidad de ondas de corte a una profundidad igual al ancho de la fundación. Este indicador se basa en el hecho de que fundaciones más grandes influenciarán más volumen de suelo que fundaciones de menor tamaño, como lo indica la teoría de bulbos de esfuerzos. La Figura 7 muestra la distribución del *drift* máximo en función del ancho de base, la capacidad, el sitio de fundación y el V_s equivalente a la base $V_s B$ para estructuras con período de 0.3 s. Se ve que en las bases pequeñas, en donde hay más contraste entre los $V_s B$ de los distintos sitios, existe una tendencia a aumentar el *drift* (mediana y dispersión de los datos) a medida que aumenta el $V_s B$. Por otro lado, para bases grandes (23 y 26 m) no se observa una tendencia clara, ya que el $V_s B$ es similar entre los sitios estudiados. En el caso del sistema que presenta una respuesta altamente no lineal (capacidad 0.1g), el efecto del $V_s B$ se observa solamente en las fundaciones de 9 m y 12 m, mientras que para las demás la mediana y la dispersión del *drift* son similares.

La respuesta máxima de giro de fundación en función del ancho de fundación y del $V_s B$, por capacidad y para los sistemas estructurales con período 0.3 s, se presenta en la Figura 8. Se aprecia que en algunos casos, especialmente para la capacidad 0.1g, existe una tendencia decreciente a medida que aumenta el

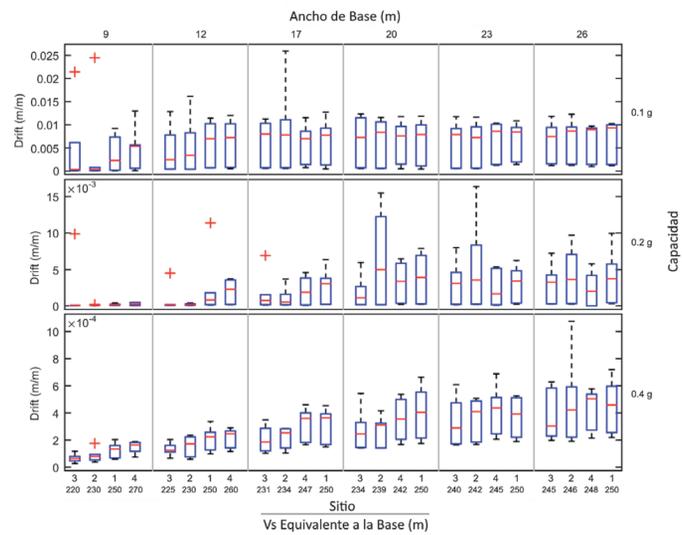


Figura 7: Distribución de *drift* según ancho de fundación para $T = 0.3$ s

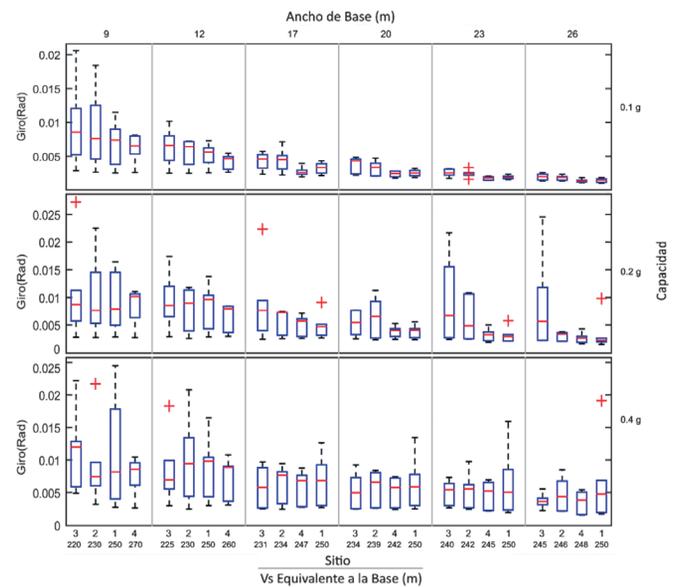


Figura 8: Distribución del giro de fundación según ancho de fundación para $T = 0.3$ s

$V_s B$ ya que la fundación gira menos al estar dispuesta sobre un suelo de mayor rigidez, pero esta tendencia no se aprecia de forma tan evidente para la capacidad de 0.4g, en donde los giros tienden a distribuirse de forma más uniforme entre los distintos anchos de fundación y $V_s B$. Para los sistemas estructurales con capacidad 0.2g, el sitio 3 muestra un comportamiento marcadamente diferente a los demás en particular para las fundaciones de 23 y 26 m. Por otro lado, las mayores diferencias entre sitios se manifiestan para el ancho de fundación de 9 m.

La Figura 9 muestra los resultados de *drift* máximo de la misma forma que la Figura 7, pero para los sistemas estructurales con períodos 0.7 y 1.2 s. Nuevamente se puede apreciar que para cada ancho de fundación existe una tendencia creciente del *drift* máximo a medida que aumenta el $V_s B$, debido a que el volumen de suelo inmediatamente bajo una profundidad igual a una vez el ancho de fundación se hace más rígido y de mayor capacidad.

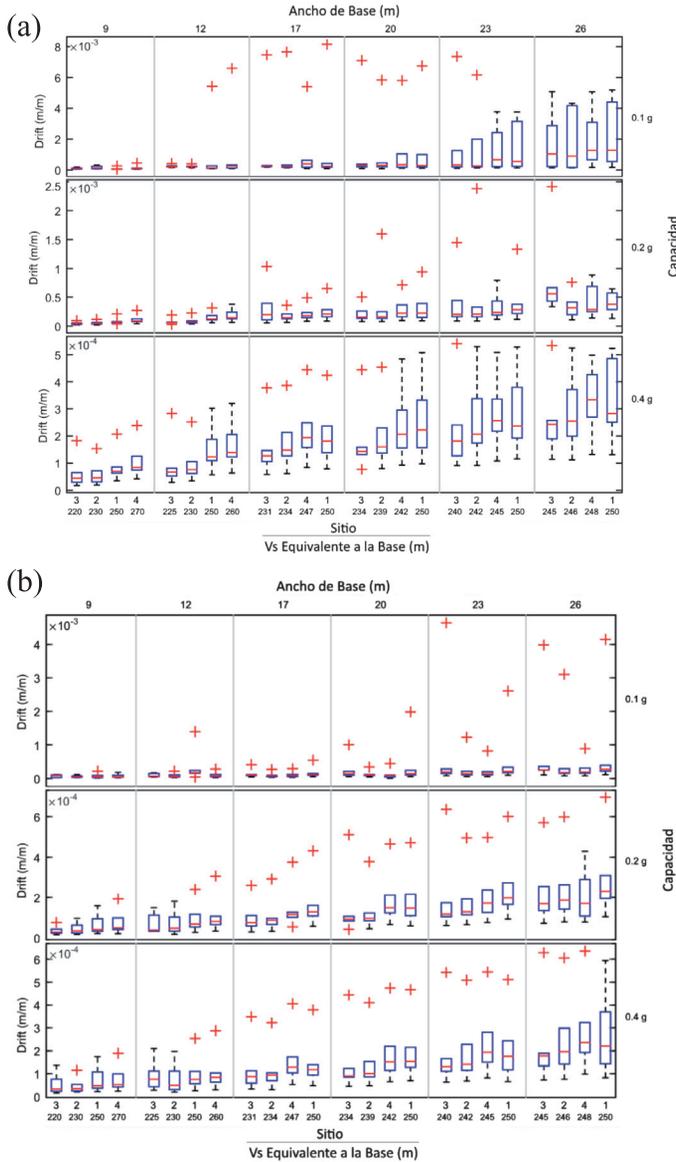


Figura 9: Distribución de drift según ancho de fundación para período: a) 0.7 s y b) 1.2 s

Por otro lado, al considerar la variación del máximo giro de fundación para cada sistema evaluado, la

Figura 10 muestra el giro de la misma forma que la Figura 8, para las estructuras de períodos 0.7 y 1.2 s. Se observa que existe una tendencia decreciente del giro de fundación a medida que aumenta el $V_s B$, particularmente en las bases más pequeñas (anchos de 9 a 17 m), en donde se manifiestan mayores diferencias entre el V_s equivalente a un ancho de fundación entre los distintos sitios.

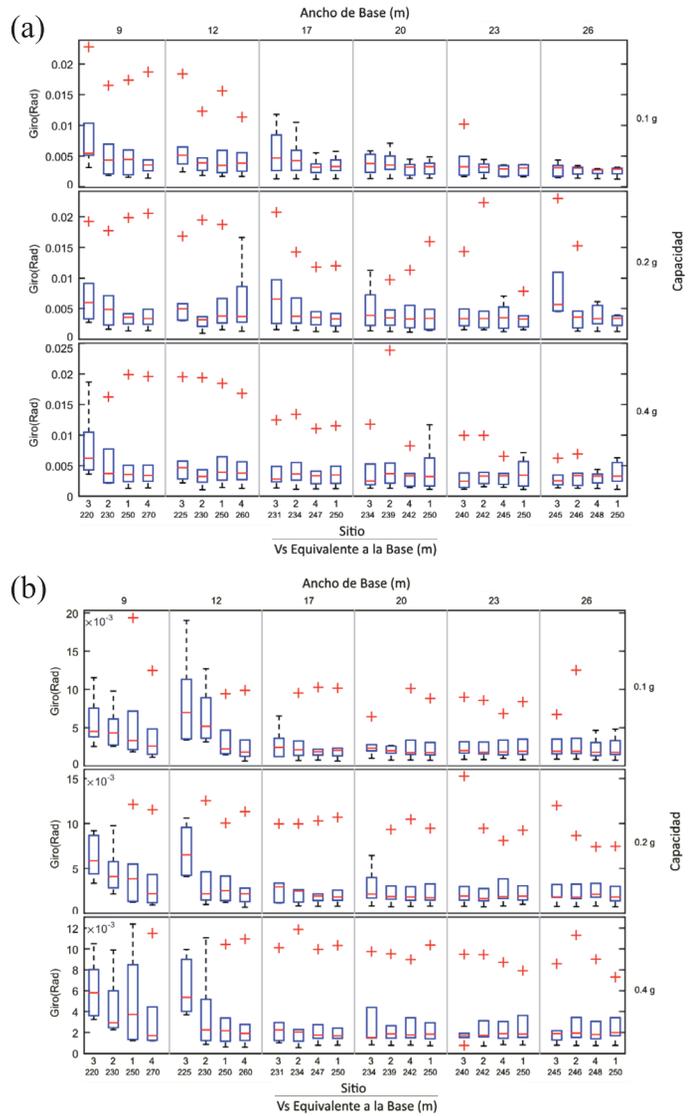
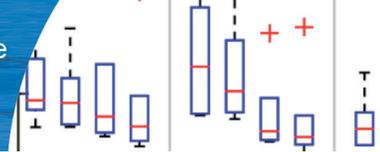


Figura 10: Distribución del giro de fundación según ancho de fundación para período: a) 0.7 s y b) 1.2 s

Por ejemplo, para el sitio 3 y la fundación de 9 m, $V_s B$ es de 220 m/s, mientras que para el sitio 4 es de 270 m/s, lo que genera que la mediana de los giros máximos es de 0.006 rad y 0.003 rad respectivamente



para el sistema estructural de 0.4g de capacidad y 0.7 s de período fundamental. Por su parte, para el ancho de fundación de 26 m no se aprecia variabilidad en el giro máximo ya que $V_s B$ de todos los sitios tienden a V_{s30} . Finalmente, para analizar objetivamente si existen diferencias de la respuesta de los sistemas suelo – fundación – estructura para cada ancho de fundación, se desarrolla la prueba de Wilcoxon y los resultados se resumen en la Figura 11, donde los cuadros indicados con verde representan los casos en que se diferencia estadísticamente de los demás. Puede observarse que, en general, a medida que aumenta la capacidad del sistema estructural, aumenta la cantidad de diferencias encontradas, por lo que el efecto del ancho de fundación toma relevancia en sistemas en que la respuesta de la estructura es predominantemente elástica. Además las diferencias se concentran entre los casos que tienen mayor contraste del tamaño de fundación, o sea donde se concentran los mayores contrastes de V_s equivalente al ancho ($V_s B$, ver Tabla 4) para todos los sitios de fundación evaluados. Aunque no se puede comparar directamente por período, ya que las estructuras de período distinto están sometidas a diferente niveles de sollicitación, se puede ver que existen menos diferencias en el período 0.3 s con 0.1g de capacidad que en los demás casos. Se puede inferir que a mayor capacidad de las estructuras, o a menor demanda solicitante, y a respuesta de la estructura en el rango elástico, la configuración estratigráfica se hace más importante.

Tabla 4: Valores del V_s equivalente a un ancho de fundación $V_s B$ para cada fundación utilizada

Sitio	Ancho de fundación B , m					
	9	12	17	20	23	26
1	250	250	250	250	250	250
2	230	230	234	239	242	245
3	220	225	231	234	240	246
4	270	260	247	242	245	248

Conclusiones

Se desarrollan análisis numéricos que permiten explorar el efecto de la distribución de V_s en el nivel de daño y desempeño sísmico de estructuras simples sobre losas de fundación y suelos granulares. Los

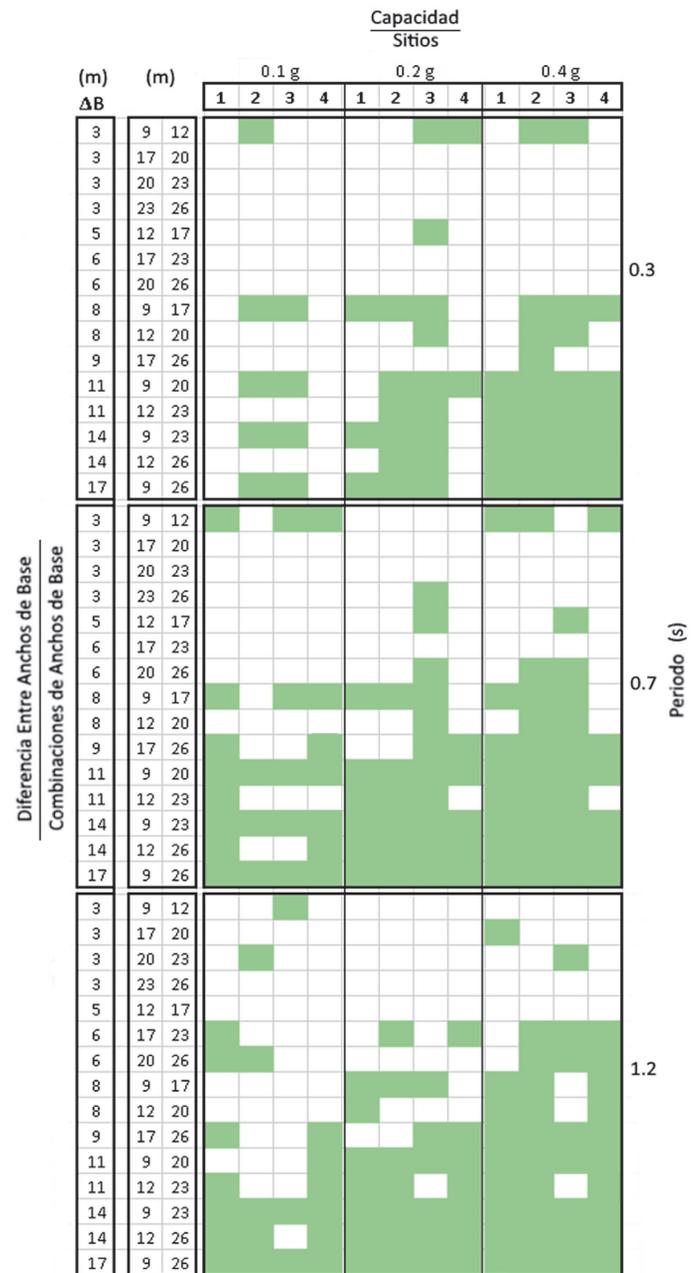


Figura 11: Diferencias estadísticamente significativas entre anchos de fundación

resultados sugieren que estructuras fundadas en sitios de igual V_{s30} e igual clasificación sísmica, pero con distinta configuración estratigráfica, presentan diferencias de comportamiento estructural. Se observa que pueden haber casos en que la clasificación de sitios de fundación en base a un indicador promedio, y la definición de una única demanda sísmica para esos sitios, tiende a subestimar los efectos de interacción suelo – fundación – estructura en la repuesta sísmica de las estructuras, particularmente en los casos en que

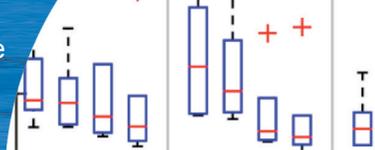
la rigidez del suelo inmediatamente bajo la fundación contrasta con la media de los 30 m. Se observa una relación inversa entre el máximo desplazamiento lateral del techo de la estructura (*drift*) y el máximo giro de fundación, en que mientras más flexible es el suelo inmediatamente bajo la fundación, mayor es el giro de fundación y menor es el *drift*. Por el contrario, si el estrato superficial es más rígido, aumenta el *drift* y disminuye el giro de fundación, por lo que se podría tener que para sitios de fundación de igual clasificación, pero distinta distribución de V_s , sometidos a la misma demanda, el nivel de daño estructural sería distinto y el rol que tendría el suelo y la estructura en el desempeño del sistema suelo – fundación – estructura sería diferente, en términos de concentrar la disipación de la energía y la incursión en el rango no lineal. Al analizar los resultados respecto del ancho de fundación, se observa que a mayor contraste en el V_s equivalente a un ancho de fundación $V_s B$, existen mayores diferencias estadísticamente significativas, y a medida que éste aumenta, el daño estructural caracterizado por el *drift* también, especialmente para las bases más pequeñas, donde el contraste entre $V_s B$ es mayor. Estos resultados sugieren que el parámetro $V_s B$ sería un mejor indicador de la rigidez del sitio de fundación que el V_{s30} , especialmente para estructuras con ancho de fundación pequeño. Se requiere profundizar la investigación en este aspecto, realizando mayor cantidad de análisis con el fin de complementar los códigos de diseño sísmico. La distribución de la rigidez del sitio de fundación es particularmente relevante cuando las estructuras trabajan en la zona de transición entre el rango elástico y la fluencia de la curva de capacidad, ya que en esos casos se encontraron diferencias en el *drift* máximo de hasta 80% entre un sitio y otro. Por otra parte, las diferencias entre sitios de fundación tiende a atenuarse cuando la estructura alcance niveles de daño importante y la incursión en el rango no lineal sea elevada, con demandas de ductilidad de desplazamiento de techo del orden de 5, llegando a un nivel de desempeño de seguridad de la vida.

Agradecimientos

La investigación se desarrolló gracias al financiamiento otorgado por el proyecto DIUBB #140714 2/I, patrocinado por la Universidad del Bío-Bío.

Referencias

- Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M. and Gerolymos, N. (2010). Soil failure can be used for seismic protection of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8(2), 309–326
- ASCE (2010). Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-10
- ATC (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Applied Technology Council. FEMA 440
- Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, Y. and Yoshimura, C. (2003). Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part I: Theory. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(2), 817–824
- Borcherdt, R.D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra* 10(4), 617–653
- BSSC (2003). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA 450 and Building Seismic Safety Council
- Conover, W.J. (1998). *Nonparametric statistics*. John Wiley and Sons
- Dobry, R., Martin, G.M., Parra, E. and Bhattacharyya, A. (1992). Development of site-dependent ratios of elastic response spectra (RRS) and site categories for building seismic codes. NCEER/SEAOC/BSSC Workshop on Site Response during Earthquakes and Seismic Code Provisions
- Elgamal, A., Yang, Z. and Parra, E. (2002). Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22(4), 259–271
- ECS (2004). Design of structures for earthquake resistance. Eurocode 8. European Committee for Standardization
- Ghannad, M.A. and Jafarieh, A.H. (2014). Inelastic displacement ratios for soil–structure systems allowed to uplift. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 43(9), 1401–1421



- Gazetas, G. and Apostolou, M. (2004). Nonlinear soil–structure interaction: foundation uplifting and soil yielding. Third USA-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction. Menlo Park, California, USA.
- Jeremić, B., Jie, G., Preisig, M. and Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **38**(5), 699–718
- Joyner, W.J. and Boore, D.M. (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America* **83**(2), 469–487
- Kausel, E. (1976). Soil - structure interaction. Soil dynamics for earthquake design. International Centre for Computer-aided Design ICCAD, Santa Margherita, Italy
- Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R. and Yañez, F. (2012). Seismic performance of high-rise concrete buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings* **1**(3), 181–194
- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division* **95**(4), 859–878
- McGann, C.R., Arduino, P. and Mackenzie-Helnwein, P. (2012). Stabilized single-point 4-node quadrilateral element for dynamic analysis of fluid saturated porous media. *Acta Geotechnica* **7**(4), 297–311
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and Fenves, G.L. (2006). The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES). User command-language manual. University of California, USA
- MINVU (2011). DS 61. Diseño sísmico de edificios. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Moghaddasi, M., Cubrinovski, M., Chase, J.G., Pampanin, S. and Carr, A. (2011). Effects of soil–foundation–structure interaction on seismic structural response via robust Monte Carlo simulation. *Engineering Structures* **33**(4), 1338–1347
- Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?. *Journal of Earthquake Engineering* **4**(3), 277–301
- NCh 433 (2009). Diseño sísmico de edificios. NCh 433 Of.1996 Mod 2009. INN, Santiago
- Stewart, J., Fenves, G. and Seed, R. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **125**(1), 26–37
- SEAOC (1995). A framework for performance-based in earthquake engineering. Structural Engineers Association of California. Vision 2000 committee
- Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A. (2008). OpenSees Soil Models and Solid-Fluid Fully Coupled Elements User’s Manual. San Diego, USA: University of California.
- Yoshimura, C., Bielak, J., Hisada, Y. and Fernández, A. (2003). Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part II: Verification and Applications. *Bulletin of the Seismological Society of America* **93**(2), 825–841
- Zhang, G. and Zhang, J. (2009). State of the art: Mechanical behavior of soil–structure interface. *Progress in Natural Science* **19**(10), 1187–1196