



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Calderín-Mestre, Francisco; Almenarez-Labañino, David; Boada-Fernández, Daniel
Consideración del fenómeno interacción suelo-estructura en edificio prefabricado

Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 4, 2020, Octubre-, pp. 79-94
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181366194007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

CONSIDERACIÓN DEL FENÓMENO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN EDIFICIO PREFABRICADO

CONSIDERATION OF THE SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN IMS BUILDING

Autores:

Francisco Calderín-Mestre, calderin@uo.edu.cu. Teléfono +53 53485636¹

David Almenarez-Labañino, dubaliere@uo.edu.cu. Teléfono +53 55326326¹

Daniel Boada-Fernández, cpc@megacen.ciges.inf.cu. Teléfono: +53
54075131¹

¹Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

La Interacción Suelo-Estructura considera la respuesta de la edificación a través de su comportamiento cinemático e inercial ante sollicitaciones dinámicas en el terreno, en relación con las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, como elemento importante en la seguridad de las estructuras. Este fenómeno es una de las limitaciones existentes en la Norma Cubana NC 46:2017; de ahí que el objetivo de este trabajo fue evaluarlo en un edificio de sistema constructivo IMS de 18 niveles, ubicado en la ciudad de mayor peligro sísmico de Cuba, mediante un estudio comparativo por los códigos de diseño americano ASCE (American Society of Civil Engineers) y mexicano, utilizando modelos simplificados, que consideran el alargamiento del período fundamental de vibración, la modificación del amortiguamiento asociado y la reducción de la ductilidad de la estructura como resultado de la flexibilidad del suelo ante la ocurrencia de sismos. Se exponen los resultados obtenidos de acuerdo con los códigos antes mencionados.

Palabras clave: *interacción suelo estructura, sismos, códigos de diseño sísmico, modelos simplificados de sistemas estructurales.*

ABSTRACT

The Soil Structure Interaction considers the response of the building in the kinematic and inertial behavior before dynamic demands in the terrain, in relation to the geological and geotechnical conditions of the site, as an important element in the safety of the structures. Based on the limitations existing in the Cuban Standard NC 46: 2017, when not considering the phenomenon, the objective is to evaluate it in an IMS building system of 18 levels located in the city of greatest seismic danger in Cuba, through a comparative study between the American design codes ASCE (American Society of Civil Engineers) and Mexican No.103-BIS using simplified models, considering the lengthening of the fundamental period of vibration, the modification of the associated damping and the reduction of the ductility of the structure, as a result of the soil flexibility before the occurrence of earthquakes. The results obtained are exposed according to the standards used.

Keywords: soil structure interaction, earthquakes, design codes, simplified models.

INTRODUCCIÓN

Innumerables son los terremotos que han ocasionado destrucción en ciudades y poblados en todos los confines de la tierra, debido al colapso total o parcial de edificaciones realizadas por el hombre. A pesar de las investigaciones efectuadas por los especialistas de todo el mundo en este campo, hasta la fecha no ha sido posible predecir la ocurrencia de un sismo; sin embargo, se pueden estimar dónde continuarán ocurriendo, debido a la geología terrestre sustentada en la Teoría de Tectónicas de Placas (Wegener, 1912; citado por Pérez-Malvárez et al., 2006) y los avances en materia de metodologías y tecnologías empleadas. Por ello resulta necesario el conocimiento de los niveles de vulnerabilidades preexistentes y de riesgo sísmico para las comunidades expuestas a este peligro.

Cuba no está exenta del peligro sísmico. Su región suroriental constituye el escenario con mayores actividades telúricas debido a la proximidad de la falla sismogénica Bartlett-Caimán. Santiago de Cuba es la zona de mayor peligro sísmico, por lo que es afectada sistemáticamente por terremotos de gran magnitud e intensidad, entre estos se destacan los referidos a los años 1766, 1852, 1932 y 1947 (Chuy, 2003).

Un plan de actuación local de riesgo sísmico permitirá conocer la peligrosidad existente, el comportamiento de los diferentes suelos frente a un sismo, la estimación de la vulnerabilidad físico-tecnológica de las construcciones, la estructura jerarquizada y funcional ante una emergencia, los procedimientos de actuación de los recursos y servicios de titularidad local y la relación con otras administraciones y planes de ámbito superior (Candebat 2017).

El conocimiento de las modificaciones que sufren los sismos, como consecuencia de las características de los suelos y las condiciones topográficas, es decisivo para el diseño sismorresistente de las edificaciones, pues las sollicitaciones que se transmiten a la estructura son muy diferentes, en dependencia del comportamiento del terreno ante estas cargas excitadas, lo cual pudiera ocasionar situaciones catastróficas (Jurado 2012).

Para la seguridad de las edificaciones, y más si son altas, es preciso valorar la relación entre las características de los movimientos del terreno, las condiciones

geológicas y geotécnicas del sitio y la respuesta de la subestructura a los movimientos del terreno. Winkler (1867, citado por Villarraga et al. 2003) plantea que esta relación se conoce como Interacción Suelo-Estructura (ISE). Este estudio se ha nutrido de las ciencias de la Ingeniería Geotécnica y la Ingeniería Estructural, de lo cual resulta el contacto dinámico entre la base y la estructura, por lo que adquiere importancia su análisis, siempre y cuando ocurra su efecto; sin embargo, existe un sinnúmero de parámetros a resolver que influyen en la determinación de los modos de vibración libre, así como en la distribución de los esfuerzos en el edificio y la cimentación, por lo que cambian las fuerzas internas en los diferentes elementos estructurales (Ulitsky 2005).

Esto hace que normativas internacionales como la norteamericana (American Society of Civil Engineers (ASCE) 2010), la mexicana (México. Gobierno del Distrito Federal, 2004), la peruana (Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009), la colombiana (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1998) y otras a escala internacional, además del análisis convencional, también tengan en cuenta la ocurrencia de este fenómeno.

El análisis realizado a la NC 46 (Comité Estatal de Normalización, 2017) revela que la misma no tiene en cuenta que la Interacción Suelo-Estructura puede modificar las propiedades dinámicas relevantes de la estructura, así como las características del movimiento del terreno en su vecindad con la cimentación, a diferencia de otros códigos internacionales, que además del análisis convencional tienen en cuenta este fenómeno.

El código cubano considera depósitos típicos de suelos con diferentes estratigrafías existentes (desde las rocas hasta suelos blandos), clasificados en correspondencia con la literatura técnica actual desde las designaciones de A hasta F. A partir de la expresión de estas características considera los análisis de la estructura como empotrada, sin considerar el efecto de Interacción Suelo-Estructura.

El hecho de que no se tome en cuenta la rigidez de la cimentación y las características dinámicas del suelo subyacente en el análisis sísmico de la edificación puede conducir a variaciones apreciables entre la respuesta sísmica

estimada y la respuesta real de la estructura. Por las razones anotadas es conveniente incluir los efectos de la ISE en el análisis sísmico de la edificación (Avilés y Pérez 2004).

Ante el peligro sísmico de la región oriental y las vulnerabilidades preexistentes, el problema de la investigación radica en las limitaciones de la Norma Cubana (Comité Estatal de Normalización, 2017) en el análisis y diseño de las edificaciones al no considerar el efecto de Interacción Suelo-Estructura (ISE), lo cual pudiera ocasionar un aumento de la energía liberada por un sismo en el comportamiento cinemático e inercial ante sollicitaciones dinámicas como resultado de la flexibilidad del suelo, a partir del alargamiento del período fundamental de vibración, la modificación del amortiguamiento asociado y la reducción de la ductilidad de la estructura.

Un análisis comparativo de las consideraciones de la ISE entre la norma norteamericana (American Society of Civil Engineers (ASCE) 2010) y la mexicana (México. Gobierno del Distrito Federal, 2004) en una estructura diseñada por la NC 46 (Comité Estatal de Normalización, 2017) pudiera contribuir a determinar cuáles serían las consideraciones a tener en cuenta ante el movimiento del terreno y su influencia en la cimentación; por tal motivo se propuso como objetivo evaluar la Interacción Suelo-Estructura (ISE) en un edificio de sistema constructivo IMS de 18 niveles a través de un estudio comparativo entre códigos internacionales, como el americano y el mexicano, mediante el uso de modelos simplificados.

El aporte de esta investigación permitirá establecer consideraciones en cuanto al estudio, análisis y cálculo de la ISE para edificios IMS de 18 niveles en suelos blandos mediante modelos simplificados, lo que incidirá en las limitaciones referidas a las Normas Constructivas y Ramales de ingeniería sísmica, a fin de reducir las vulnerabilidades estructural-tecnológicas y la búsqueda de soluciones ingenieriles para los riesgos existentes en el oriente cubano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Considerar el efecto de ISE es tomar en cuenta las propiedades elásticas del suelo, a partir del planteamiento de que el suelo no es infinitamente rígido, como suele definirse en la mayoría de análisis, sino que tiene cierto grado de amortiguación y absorbe parte de la energía entregada por un sismo (Avilés 1999). Esto va a ocasionar que una menor cantidad de energía llegue a la superestructura; por ende, los elementos estructurales soportarán menores fuerzas internas que lo que se obtiene del cálculo común sin considerar el efecto, en caso de que ocurra.

La respuesta sísmica de la estructura está íntimamente ligada a la forma en cómo los movimientos sísmicos del terreno afectan la estructura a través de su cimentación, las características dinámicas del suelo subyacente, la rigidez y disposición de la cimentación y el tipo de sistema estructural de la edificación interactúan entre sí para caracterizar los efectos sísmicos sobre ella.

Dependiendo de las características de la estructura, su cimentación y suelo subyacente, la respuesta de la estructura ante solicitaciones estáticas verticales y dinámicas puede variar con respecto al estimativo que se realiza, sin tener en cuenta su efecto en los siguientes aspectos:

- La presencia de suelos blandos y compresibles en la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo losas de fundación, tanto ante solicitaciones de cargas verticales como horizontales.
- Variaciones en los períodos de vibración de la edificación.
- Aumento del amortiguamiento viscoso equivalente del sistema estructura-cimentación-suelo.
- Variación en la distribución de las fuerzas cortantes horizontales producidas por los movimientos sísmicos.

Al incidir una acción dinámica la respuesta del suelo afecta al movimiento de la estructura y, a su vez, la respuesta de la estructura modifica el movimiento del suelo. La interacción sísmica suelo-estructura no debe confundirse con los efectos del suelo, que representan solo las modificaciones que sufre la señal sísmica al

pasar a través de un perfil de suelo o los debidos a las condiciones topográficas del sitio.

El uso de estas recomendaciones reduce los valores de las fuerzas laterales, el cortante basal y los momentos de volteo, calculados para una estructura supuesta con base indeformable, e incrementa los desplazamientos laterales. Solo se justificará tomar en cuenta los efectos de la ISE cuando se cumpla la condición:

$$\frac{T_e H_s}{T_s H_e} < 2.5$$

Donde: H_s espesor de la estratigrafía, H_e altura de la estructura, T_s período dominante del sitio, T_e período fundamental de la estructura supuesta con base rígida.

Normalmente el análisis en edificios se lleva a cabo suponiendo que el movimiento que se aplica en su base o las fuerzas estáticamente equivalentes en los distintos niveles son independientes de las características de la cimentación. Sin embargo, existen casos en que el movimiento en cualquier punto de la frontera suelo-estructura es sensiblemente diferente del que habría ocurrido en dicho punto si la estructura no estuviese presente.

Resulta imposible resolver los diversos problemas de la ingeniería sísmica sin la elaboración fundamentada de los modelos físicos aproximados de las estructuras, con lo cual se propone la elección del tipo de modelo de interacción y el modelo estructural, íntegramente relacionados. La principal exigencia para estos modelos es su aproximación cercana a la realidad.

Los modelos simplificados utilizan exclusivamente los grados de libertad (GL) físicos de la fundación prescindiendo de otros GL agregados (internos o generalizados). Los primeros criterios de diseño para el análisis de estructuras apoyadas sobre fundaciones superficiales incorporan solamente resortes con coeficientes de rigidez estática en los GL de la interfaz para la obtención de matrices modales con amortiguamiento clásico.

En los modelos simplificados de fundaciones superficiales (Roesset & Whitman, 1973; Bielak, 1976) se recurre a criterios energéticos en la determinación de un amortiguamiento modal equivalente para cada uno de los modos clásicos

superpuestos, incorporando una matriz de masa agregada (independiente de la masa propia de la fundación y la estructura), lo que mejora además la aproximación de la rigidez dinámica exacta en rangos de baja y media frecuencia. El grado de aproximación conseguido se evalúa en comparación con soluciones rigurosas obtenidas frecuencia por frecuencia.

Los modelos simplificados con coeficientes de diseño (Richart et al., 1970) presentan propiamente coeficientes para placas de fundación que reproducen adecuadamente la amplificación dinámica del modo fundamental de cuerpo rígido. Los coeficientes se aplican teniendo en cuenta la forma de la placa, pudiendo ser circulares o cuadradas; además, se adopta del estándar de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil (ASCE STANDARD 1986 por sus siglas en inglés) (American Society of Civil Engineers (ASCE), 1986) para el análisis sísmico de estructuras relacionadas a la actividad nuclear. Estos coeficientes son aplicables al análisis del movimiento traslacional en la dirección horizontal vinculada al eje (y), al movimiento rotacional alrededor de los ejes horizontales y al giro alrededor del eje (z). Los coeficientes de amortiguamiento de diseño se determinan en función de las relaciones de amortiguamiento y los coeficientes de amortiguamiento crítico.

Para los modelos simplificados con coeficientes asintóticos, el coeficiente de rigidez corresponde al valor asintótico puramente real de la rigidez dinámica para bajas frecuencias, mientras que el coeficiente de amortiguamiento se vincula al valor asintótico puramente imaginario de la pendiente de la rigidez dinámica para altas frecuencias. Los coeficientes asintóticos se adecuan tanto para placas circulares (Wolf 1994) como para placas cuadradas (Wen-Hwa & Wen-How, 2002), por ello el coeficiente asintótico de rigidez horizontal difiere levemente del coeficiente de diseño debido a las diferentes hipótesis consideradas durante la eliminación del término de acoplamiento del movimiento de balanceo. Mientras, el coeficiente de amortiguamiento asintótico empleado tiene en cuenta la relación entre el comportamiento para altas frecuencias de una fundación apoyada sobre un semiespacio homogéneo y la propagación de ondas unidimensionales de una

barra prismática vertical semiinfinita con la sección de la placa de fundación (Gazetas & Dobry, 1984).

Por último, los modelos simplificados con masa agregada, en los que, independiente de la masa propia de la fundación y la estructura, la introducción de coeficientes de masa agregada mejora la aproximación para bajas y medias frecuencias respecto a las soluciones rigurosas de la rigidez dinámica. Los resultados más exactos que pueden obtenerse en estos rangos de frecuencia sin la incorporación de GL generalizados en las matrices físicas de la fundación se consiguen utilizando los coeficientes propuestos por Zhang & Wolf (1997); aun así, los errores producidos por la masa agregada para altas frecuencias resultan significativos.

Para la presente investigación se emplearon los modelos simplificados, teniendo en cuenta el efecto de interacción suelo–estructura mediante la metodología para el análisis del efecto de la ISE a través de modelos simplificados de la norma americana (American Society of Civil Engineers (ASCE) 2010) y la metodología para el análisis del efecto de la ISE a través de Modelos Simplificados de la norma mexicana (México. Gobierno del Distrito Federal, 2004).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, teniendo en cuenta la provincia y el municipio donde se encuentra la edificación debido al peligro sísmico de la zona, así como las principales características, fueron los siguientes:

Número de niveles: planta baja + diecisiete niveles de vivienda.

Largo: 34,50 metros.

Ancho: 17,70 metros.

Ancho con voladizos: 19,65 metros.

Puntal típico (piso a piso): 2,70 m.

Altura del nivel 0 a la azotea: 48,60 m.

Altura del nivel 0 a cuarto de motores: 51,30 m.

Área de plantas de viviendas: 8753,13 m².

Área libre en planta baja: 352,80 m².

Área de circulación: 1525,04 m².

Área de servicio (oficinas en planta baja y sótano): 668,24 m².

Área total: 11299,21 m².

A partir de los tres análisis realizados, los principales parámetros y/o resultados se muestran en las tablas 1 y 2 y en el gráfico 1.

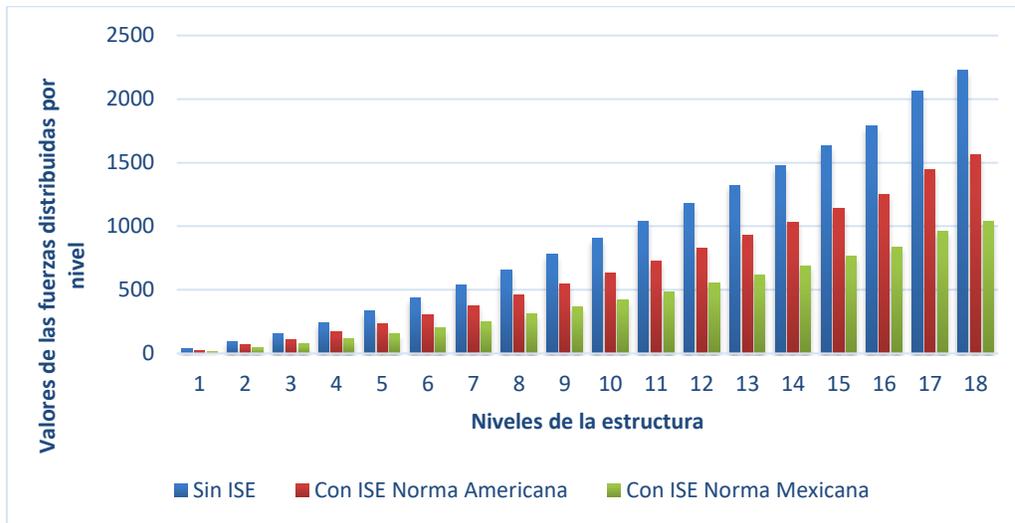
Tabla 1. Parámetros de la estructura				
Nomas	Período (T)	Cortante Basal (V)	Desplazamientos	
			x	y
NC 46: 2017 (sin ISE)	1.4seg	16903.9 KN	0.019023 m	0.02181 m
ASCE 7-10 (con ISE)	1.62seg	11832.73 KN	0.037 m	0.025 m
No.103-BIS (con ISE)	1.64seg	7895.42 KN	0.025 m	0.026 m

Fuente: Boada (2018)

Tabla 2. Distribución de la fuerza cortante según los tres análisis			
Nivel	NC 46: 2017 Fi (KN)	ASCE 7-10 Fi (KN)	No.103-BIS Tomo II 2004 Fi (KN)
1	33.3	23.3	15.5
2	95	66.5	44.4
3	158.1	110.6	73.8
4	239.9	167.9	112
5	331.5	232.1	154.8
6	431.8	302.3	201.7
7	540	378	252.2
8	655.3	458.7	306.1
9	777.4	544.2	363.1
10	905.7	634	423
11	1039.9	727.9	485.7
12	1179.8	825.8	551
13	1324.9	927.5	618.9
14	1475.3	1032.7	689.1
15	1631.9	1142.3	762.2
16	1792	1254.4	837
17	2064.2	1444.9	964.1
18	2228	1559.6	1040.7
Σ	16904.00	11832.7	7895.3

Fuente: Boada (2018)

Gráfico 1. Comparación de la distribución de las fuerzas de cortante por nivel según cada análisis (con ISE y sin ISE)



Fuente: Boada (2018)

DISCUSIÓN

Considerar el efecto de interacción suelo-estructura permite tener en cuenta las modificaciones de las propiedades dinámicas de la edificación de manera conjunta con el suelo de fundación, ya que este último no siempre se comporta totalmente rígido como se suele considerar en los análisis clásicos.

El análisis de la ISE ante cargas sísmicas evidencia que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en el período fundamental de vibración, el amortiguamiento asociado y la ductilidad de la estructura; lo que puede ser logrado usando resortes equivalentes a la rigidez del suelo.

Los métodos simplificados en el análisis de la ISE consideran, además de la rigidez de la estructura, los coeficientes de amortiguamiento, lo cual incide en las propiedades dinámicas relevantes de la estructura modificada por el fenómeno. El resultado obtenido es prácticamente más conveniente.

Considerar el efecto de ISE en el edificio estudiado redujo considerablemente los valores de la fuerza cortante en cada uno de los niveles de la estructura y aumentó considerablemente los desplazamientos en las direcciones horizontales de la estructura.

Los resultados demuestran que el cortante basal tiene un valor de 16904.00KN sin considerar el efecto de interacción, mientras que considerando el efecto por los códigos No. 103-BIS (México. Gobierno del Distrito Federal (2004) y ASCE (American Society of Civil Engineers (ASCE) 2010) arrojó valores de 7895.3KN y 11832.7KN respectivamente.

Se constató que los resultados que ofrece la norma mexicana difiere en un 33 % en comparación con los ofrecidos por la americana, al tener en cuenta el grado de amortización de la estructura estudiada.

CONCLUSIONES

- I. La Interacción Suelo Estructura (ISE) permite determinar simultáneamente el comportamiento del suelo de fundación con la edificación frente a eventos sísmicos. Esto demuestra que ante tal escenario el suelo coadyuva a una mejor distribución de esfuerzos en todos los elementos estructurales de la edificación, mediante la disipación de cierto porcentaje de energía inducida por un sismo.
- II. La NC 46:2017, al no considerar los efectos de ISE, arroja valores de cortante cuantitativamente mayores que los códigos empleados en esta investigación, cual puede recaer en un sobrediseño y el aumento significativo de los índices económicos.
- III. Después de la obtención de los principales parámetros mediante ambos códigos internacionales se corroboró que ambos ofrecen similares valores de períodos fundamentales y desplazamientos en el sentido vertical y, no así en los desplazamientos horizontales en x y los valores de cortante, resultando mayores por la norma americana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Civil Engineers (ASCE). (1986). *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures*. Virginia, EEUU: Autor.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010). *ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures*. Structural Engineering Institute. https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/dd_jardins/DDJ-148%20ASCE%207-10.pdf

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998). *NSR-98 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente*. http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/docentes/oscar_gutierrez/descargas/TxtuloF.pdf

Avilés, J. (1999). Interacción suelo-estructura: conceptos de diseño. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 61, 23-55. <https://smis.mx/index.php/RIS/article/download/243/181/>

Avilés, J. y Pérez-Rocha, L. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 71 julio-diciembre, 1-36. <http://www.redalyc.org/html/618/61807101/>.

Bielak, J. (1976). Modal analysis for building-soil interaction. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 102(5), 771-786. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0006949>

Boada, D. (2018). *Consideración del fenómeno Interacción Suelo-Estructura* (Tesis en opción al título de Ingeniero Civil). Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba (No publicado).

Comité Estatal de Normalización (2017). *NC 46: 2017 Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y la construcción*. La Habana, Cuba: autor. <https://es.scribd.com/document/373479452/118-NC-46-Construcciones-Sismorresistentes>

Candebat Sánchez, D. (2017). *Procedimiento de análisis del riesgo para la rehabilitación estructural sismorresistente de puentes de hormigón, de vigas, de carreteras* (Tesis de Doctorado). Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana, Cuba. <http://www.cenais.cu/productos/publicaciones/TESIS/DOCTORADOS/TESIS%20DOCTORAL-Dario%20Candebat.pdf>

Chuy Rodríguez, T.J. (2003). Macrosísmica de Cuba: su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica. *Minería y Geología*, 19(1-2), 43-50. https://www.researchgate.net/publication/277202448_Macrosismica_de_Cuba_su_aplicacion_en_los_estimados_de_peligrosidad_sismica

Gazetas, G. & Dobry, R. (1984). Simple radiation damping model for piles and footings. *Journal of Engineering Mechanics*, 110(6), 937–956. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281984%29110%3A6%28937%29>

Jurado Cabañes, C. (2012). *Problemas de interacción suelo-estructura en cimentaciones y muros de contención. Influencia de los fenómenos de despegue y deslizamiento* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España. <http://oa.upm.es/13731/>

México. Gobierno del Distrito Federal (6 de octubre de 2004). Acuerdo por el que se dan a conocer las normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. En *Gaceta Oficial del Distrito Federal* (Órgano del Gobierno del Distrito Federal) (pp. 1-284), Tomo II No.103-BIS. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Avisos/DFAVIS159.pdf>

Pérez-Malvárez, C., Bueno H.A., Fera O.M. y Ruiz R.R. (2006). Noventa y Cuatro años de la teoría de la deriva continental de Alfred Lothar Wegener. *Interciencia*, 31(7), 536-543. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000700013&lng=es&tlng=es

Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009). *Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)*. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

Richart, F.E., Hall, J.R. & Woods, R.O. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Roesset, J. & Whitman, R. (1973). Modal analysis for structures with foundation interaction. *Journal of the Structural Division*, 99(3), 399-416. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0020266>

Ulitsky, V.M. (2005). *Soil-Structure Interaction: Calculation Methods and Engineering Practice* (Volume I). Saint Petersburg.

Villarraga, M., Pineda, M., Ramírez, A., Ramírez, C., Arango, J., Rodríguez, R. y Valencia, J. (2003). *Estudio paramétrico de los efectos de la interacción sísmica suelo estructura*. Universidad Nacional de Colombia. https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/interacci%C3%B3n_suelo/02_manuel_roberto.pdf

Wolf, J. (1994). *Impedance function of a group of vertical piles*.
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:12622533

Zhang, C. & Wolf, J. (eds.) (1997). *Dynamic soil-structure interaction*. Elsevier Science.
<https://www.elsevier.com/books/dynamic-soil-structure-interaction/zhang/978-0-444-50035-9>

Wen-Hwa, W. & Wen-How, L. (2002). Systematic lumped-parameter models for foundations based on polynomial-fraction approximation. *Earthquake Engng Struct.*, 31, 1383–1412. <https://doi.org/10.1002/eqe.168>

Recibido: 6 de marzo de 2020

Aprobado: 18 de agosto de 2020