

Incidencia de la interacción dinámica suelo – estructura en puentes de carretera

Incidence of dynamic soil-structure interaction in road bridges

Vivian Hernández Columbié

Universidad de Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0003-1989-2427>

vivianhc86@gmail.com

Patricia Mercedes de Zayas Núñez

Empresa de Proyecto Vértice. Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0003-0003-3606>

dzayasp96@gmail.com

RECIBIDO

10/02/2022

ACEPTADO

25/08/2022

RESUMEN

Los puentes de hormigón de carreteras son estructuras complejas, y en dependencia de las características del suelo donde se desplantan, pueden llegar a ser más susceptibles a los efectos de la interacción suelo - estructura que otro tipo de obra. La falla de los mismos puede causar importantes pérdidas económicas y ante la acción sísmica deben mantener su integridad, pues de ellos depende la funcionalidad de las vías. Es por tal razón que, se determina la influencia de la interacción dinámica suelo - estructura en un puente de hormigón, de tipología soviético-cubana, considerando las propiedades del suelo a partir del coeficiente de balasto. Con la aplicación de un conjunto de métodos de investigación del nivel teórico, empírico y estadístico se logra constatar que, desde el punto de vista geotécnico y estructural, el puente se torna más vulnerable ante carga sísmica al considerar la interacción suelo – estructura.

ABSTRACT

Concrete highway concrete bridges are complex structures, and depending on the characteristics of the soil where they are built, they can be more susceptible to the effects of soil-structure interaction than other types of structures. Their failure can cause important economic losses and they must maintain their integrity in the face of seismic action, since the functionality of the roads depends on them. For this reason, the influence of the dynamic soil-structure interaction in a concrete bridge of Soviet-Cuban typology is determined, considering the soil properties from the ballast coefficient. With the application of a set of theoretical, empirical and statistical research methods, it is found that, from the geotechnical and structural point of view, the bridge becomes more vulnerable to seismic loads when considering the soil-structure interaction.

PALABRAS CLAVE

Estructura; interacción; hormigón; puente; suelo.

KEYWORDS

Structure; interaction; concrete; bridge; soil.

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica actual, evidencia que los puentes son altamente vulnerables ante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud. Esta situación motiva a que se profundice en la solución de estos problemas y se actualicen las normas para lograr diseños más seguros. Como muestra de la actividad sísmica de las últimas décadas se encuentran los sucesos ocurridos en Valdivia, Chile en 1960 considerado el seísmo más fuerte registrado en la historia de la humanidad con una magnitud de 9,5 que describe la energía total liberada en el sismo.

Otro ejemplo fueron los acontecidos en Puerto Príncipe, Haití en 2010 y en Ecuador el 16 de abril de 2016 en las regiones de Manabí y Esmeralda quienes cobraron la vida de centenas de personas y dejaron grandes pérdidas económicas. Estos sucesos evidencian ciertos puntos vulnerables en las construcciones y la necesidad de prestarle mayor importancia al diseño sismo-resistentes de las obras, para garantizar así un proyecto equilibrado que resista estos eventos naturales. La respuesta de una estructura durante un sismo, es afectada por la interacción de tres sistemas interconectados: la estructura, la cimentación y el suelo en la cual está cimentada. La interacción dinámica suelo estructura considera la respuesta colectiva de estos sistemas, debido a una excitación proveniente de un movimiento sísmico específico (Kramer, 1996).

La interacción dinámica suelo - estructura modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en la vecindad de la cimentación. El alargamiento del periodo fundamental, la modificación del amortiguamiento asociado y la reducción de la ductilidad, respecto a los valores de base rígida, son producto de la interacción inercial (Avilés, 2003). Si el cimiento es suficientemente rígido, la interacción cinemática se manifiesta en una reducción de los movimientos de traslación de la cimentación (filtrado de los componentes de alta frecuencia de la excitación sísmica), así como en la generación de cabeceo y torsión de la cimentación (Luco et al., 1987).

Entre las afectaciones que sufren los puentes producto de la interacción dinámica suelo - estructura se encuentran la amplificación de desplazamientos debido a efectos del suelo. Los puentes en ocasiones son construidos en suelos suaves y licuables y estas características propician la amplificación de las ondas sísmicas aumentando de esta forma la pérdida de apoyo del tablero. Otra falla es el hundimiento o caída del estribo y la rotación del mismo debido a la respuesta de suelos suaves y a la existencia de un relleno por lo general no consolidado en su totalidad. El daño estructural debido al fallo del suelo y licuación, es otro daño típico que manifiestan los puentes de carretera, la socavación, es igual de perjudicial y contribuye a la inestabilidad del apoyo de la estructura.

En este contexto Solano (2011) expresa que:

en la práctica se presenta un problema multidimensional, dado por la discrepancia entre el comportamiento estructural del modelo y el que tendrá el edificio una vez construido. Uno de los aspectos causantes de esa diferencia proviene de la consideración de que el suelo y la estructura forman una unión infinitamente rígida (condición empotrada). Esta idealización difícilmente será correcta y se cumple sólo para el caso de una cimentación muy rígida, un lecho de cimentación igualmente rígida y una estructura relativamente ligera. (pág.4)

En este sentido, Todorovska (2002) define:

a la interacción suelo-estructura como el conjunto de cambios en la respuesta del suelo-cimentación-estructura que en general es causado por dos fenómenos; la flexibilidad del terreno de desplante, y el cambio en los movimientos de entrada debido a la presencia de la estructura. En general estos fenómenos se manifiestan como un aparente incremento en el periodo fundamental de la estructura, el incremento de los componentes de cabeceo en la cimentación, la reducción del cortante basal máximo debido a la difracción y refracción de ondas en la cimentación. (pág.139)

Dentro de este contexto se han venido desarrollando trabajos de investigación que han tenido como objetivo determinar la vulnerabilidad detallada de las estructuras donde la mayoría se basan en un modelo de base rígida o empotrada. Sin embargo, Pérez, et al (2007) refiere que:

una de las consecuencias de los efectos de interacción suelo - estructura es el aparente aumento del periodo del sistema, con respecto a un modelo ideal de apoyo empotrado. Este fenómeno puede traer incrementos o reducciones en la respuesta estructural, dependiendo del periodo resonante en el espectro de respuesta. También, cambiará la respuesta debido al incremento del amortiguamiento producido por la disipación de energía por comportamiento histerético y radiación de ondas en el suelo. En general, los efectos de interacción son benéficos para estructuras con periodo fundamental mayor que el periodo dominante del suelo, pero son perjudiciales en caso contrario. (pág. 1435)

La modelación del fenómeno de la interacción suelo - estructura ante cargas dinámicas, como es la acción de un sismo, puede ser planteada desde dos perspectivas: usando un modelo que involucre a la estructura y el suelo circundante como un solo sistema (método directo) o mediante el método de subestructuras, que basado en el principio de superposición descompone el problema en partes más manejables y fáciles de revisar (Wolf, 1985).

Afirma Danna (2013) que:

los puentes son estructuras esenciales durante la ocurrencia de un terremoto. Por su parte, (Guillén, 2019) comenta que históricamente no se ha tomado en cuenta los efectos de la interacción suelo estructura en el diseño y análisis sísmico de puentes. La mayoría de los estudios de interacción suelo - estructura en los últimos 25 años se dedicaron exclusivamente a edificios y estructuras relacionadas con centrales nucleares. Así mismo los análisis de la repuesta sísmica de puentes soportados por pilares y estructuras similares no han sido desarrollados en extenso por los investigadores. (pág. 3380)

Según Díaz et al, (1997):

el comportamiento de un puente es complejo y diferente al de otro tipo de estructuras como edificios regulares, en los cuales su comportamiento depende básicamente del periodo fundamental, por lo que, en el análisis dinámico de puentes es importante considerar un buen número de modos de vibrar que permita definir de mejor manera su respuesta estructural, debido a que sus valores de periodo son comparables con el del periodo fundamental. (pág. 1005)

Otro autor que comparte esta idea es Zepeda, et al. (1999) al afirmar que: los puentes son construcciones muy particulares, formados generalmente por un sistema estructural simple. Esto tiene ventajas y desventajas. En comparación con otro tipo de estructuras como las edificaciones, los puentes carecen de altos grados de redundancia por lo que la falla de un elemento estructural podría resultar en un colapso de la estructura, mientras que por otro lado la simplicidad debe de dar una mayor confianza en la predicción de la respuesta sísmica sin olvidar que ésta misma simplicidad puede conllevar a una mayor sensibilidad a errores de diseño. La misma simplicidad los hace más susceptibles a efectos como el efecto P-delta ($P-\Delta$) y la influencia de la inercia rotacional (momento de cabeceo). (pág. 339)

Los puentes son típicamente más susceptibles a los efectos de la interacción suelo - estructura que otro tipo de estructuras. Las respuestas dinámicas al movimiento del terreno pueden ser difíciles de predecir sobre todo en puentes de claros muy largos o puentes largos, como consecuencia de movimientos no sincrónicos en los diferentes apoyos debidos a los efectos de viaje de las ondas. Esto se acentúa si consideramos que muchos de los puentes son construidos en condiciones de terreno difíciles: barrancas, alrededores de ríos o estuarios, cercanos a otras estructuras o inclusive pegados a fallas.

La interacción dinámica suelo - estructura puede ocasionar además ante eventos sísmicos importantes fallas en los elementos estructurales de los puentes hasta llegar incluso al colapso de los mismo. Dichas fallas o daños físicos pueden conducir a consecuencias de diversas clases, entre las que se pueden mencionar los costos directos, como los de reparación, o los indirectos, como los asociados

a la interrupción del servicio; de igual manera impacta en la posible pérdida de vidas humanas, la generación de problemas de salud, o diversas formas de impacto socio-económico, así lo corrobora (Rivera, 2007). Entre las causas que ocasionan las fallas o daños físicos en los puentes de manera general se pueden citar: fallas de los elementos estructurales, condiciones geotécnicas, hidrológicas, constructivos o por inestabilidad de los suelos (licuefacción), entre otros.

Tradicionalmente, el diseño sísmico de estructuras, como los puentes, se lleva a cabo suponiendo que la superestructura es independiente de las propiedades del subsuelo y de las características de la cimentación. Por lo que el método más usado por los ingenieros para desarrollar el análisis es considerar que la estructura está cimentada sobre una base rígida y que el movimiento del terreno no se altera por la presencia de la misma. La problemática se enmarca en la incidencia que presenta la consideración de la interacción suelo – estructura en puentes de hormigón y el principal objetivo es determinar cómo influye en la respuesta estructural del puente el considerar los efectos de dicha interacción.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la investigación se siguió un análisis empírico que identificó las experiencias en cuanto a las investigaciones de interacción dinámica suelo - estructura y su incidencia en la respuesta dinámica de las estructuras en específico, los puentes. Se emplea como caso de estudio un puente de hormigón armado isostático, de 3 luces de 16m cada una.

Para el análisis de la interacción suelo – estructura se parte de un modelo de elementos finitos con el uso del software CSI-Bridge V-15. Se considera que para las condiciones geológicas e hidrogeológicas y las propiedades geotécnicas un perfil que clasifica como tipo “D”. Se incluyen en el modelo las cargas y combinaciones necesarias tales como la carga dinámica a través del empleo del espectro de diseño y acelerogramas, el empuje del suelo y del agua sobre las pilas.

Se empleó, además, el siguiente sistema de métodos de investigación:

Métodos teóricos:

- Histórico-lógico: para revisar el marco teórico con una perspectiva que permita un análisis histórico del desarrollo de la temática de la interacción suelo – estructura.
 - Hipotético-deductivo: Se elaboró la hipótesis de la investigación, se precisaron las variables y se escogió una lógica investigativa.
 - Análisis - síntesis: para el análisis de la información procedente de la caracterización histórica, teórico – metodológica y empírica.
-

- **Sistémico estructural:** desarrolla el análisis, tanto teórico como práctico, a través de su descomposición en los elementos que lo integran; permitirán determinar los indicadores y variables que más inciden y su interrelación como resultado de un proceso de síntesis.

Métodos empíricos:

- **Análisis documental:** Se empleó en gran medida para la búsqueda de información relacionada con la caracterización histórica, teórico-metodológica y empírica en torno a la interacción suelo - estructura en puentes.

Métodos estadísticos:

- **Métodos estadísticos descriptivos:** Posibilitaron la gestión y recepción de los datos para una mejor interpretación y representación de las informaciones derivadas del análisis del objeto de la investigación y de la validación del diseño.

Entre los materiales utilizados en la investigación se encuentran:

- La Norma cubana emitida por la Oficina Nacional de Normalización (NC), NC 46-2017, Construcciones sismorresistente – Requisitos básicos para el diseño y construcción. Empleada para la determinación de las cargas sísmicas, la construcción del espectro de respuesta asociado al sitio de interés, clasificación del tipo de perfil de suelo y obtención del periodo de suelo.
- La Norma cubana NC 733-2009, Carreteras – Puentes y Alcantarillas – Requisitos de diseño y métodos de cálculo, emitida por la Oficina Nacional de Normalización (NC). Esta norma refleja las consideraciones para establecer las cargas accidentales y las combinaciones de carga a emplear en puentes se asumen a partir de la norma (AASHTO LRFD Bridge, 2017)
- La determinación de las cargas permanentes actuantes se realiza a través de la Norma Cubana emitida por la Oficina Nacional de Normalización (NC): NC 283-2003 Densidad de Materiales Naturales, Artificiales y de Elementos de Hormigón como Cargas de Diseño.
- Se emplea como modelo de comportamiento del suelo el método del coeficiente de balasto desarrollado por Winkler en el año 1867, referido por (Alvarado, et al 2011)
- La metodología empleada en la obtención del coeficiente de balasto tanto horizontal como vertical se realiza según lo planteado en el (Manual de Carreteras, 2016), Volumen No.3: Manual de Carreteras. Instrucciones y criterios de diseño, confeccionado por la dirección de vialidad de Chile. Dicho manual también hace referencia a la metodología para el análisis del deslizamiento y la capacidad de carga del suelo.
- El análisis lineal se realiza a través del Método C: Método de Capacidad / Demanda de componentes y el para el análisis dinámico no lineal se emplea

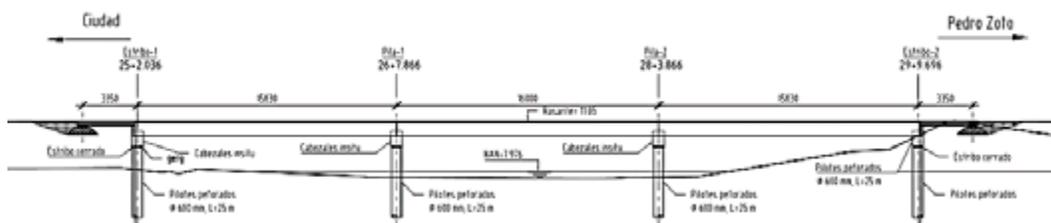
el Método E o el método del análisis de en la historia del tiempo ambos recomendados en (FHWA, 2006).

- Se emplea el programa Seismo Match V2.1.0 como herramienta para ajustar y hacer acelerogramas a partir de espectros, lo cual facilita el análisis por el método E.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El puente a analizar se compone de tres luces de 16 m cada una, correspondientes a la versión isostática del proyecto soviético cubano figura 2 y 3, la cimentación a su vez por pilotes perforados con camisa perdida de 600 mm de diámetro, colados “in situ”, los que se apoyan en punta en un estrato rocoso que se encuentra entre 20 y 25 m de profundidad como se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Elevación del puente caso de estudio.



Fuente: Rusiel (2017)

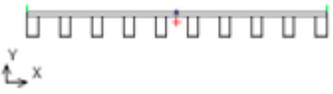
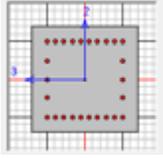
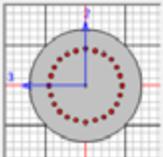
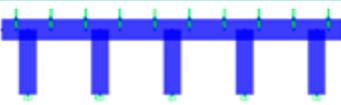
El tablero se compone por losas prefabricadas denominadas ET-66-01 que se apoyan en las vigas y que funcionan como cofre para la fundición superior del tablero que se encarga de unir todos estos elementos logrando un vínculo entre ellos y que los obliga a trabajar como un emparrillado, garantizando así la rigidez de la superestructura.

El puente no tiene juntas en el tablero, es decir, es continuo a pesar de que las vigas son isostáticas, pues estas juntas de dilatación son innecesarias para la longitud de este puente que es de unos 48 m.

Los apoyos cuentan con una losa de hormigón armado que se apoya en un muro que se encuentra encima del cabezal, ambos elementos fundidos “in situ”. Esta losa de apoyo se vincula mecánicamente a la losa del tablero del puente, de esta forma se garantiza la continuidad estructural de los elementos. Dicha losa en su otro extremo se apoya sobre un tación de apoyo prefabricado, ET-61-01, según la tipología del proyecto típico, y este a su vez en un colchón de grava de forma trapezoidal de bases de 1 y 1.9 m cada una y una altura de 0.4 m.

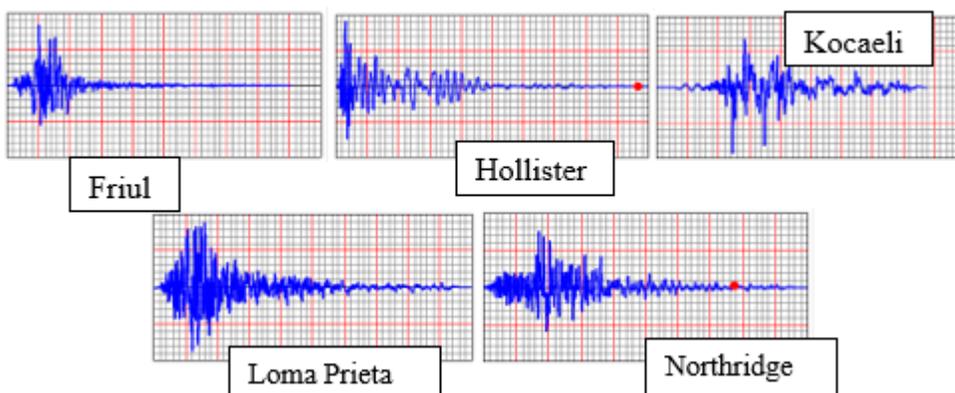
Las columnas del pretil se construyen “in situ” y las barandas son prefabricadas del tipo ET-60-01. Los estribos son cerrados y se construyen con hormigón armado entre los pilotes, el refuerzo se une por medio de soldadura a las camisas de

Tabla 1. Elementos empleados para la conformación del modelo geométrico con el CSI Bridge.

Elemento	Material	Sección transversal
Tablero	Losa: Hormigón 30 MPa pref. Viga: Hormigón 30 MPa pref.	
Cabezal	Hormigón 30 MPa "in situ" Acero G-40	
Pilotes	Hormigón 30 MPa "in situ" Acero G-40	
Estribo y pila	Hormigón 30 MPa "in situ" Acero G-40	

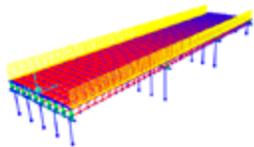
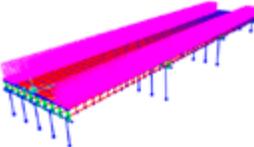
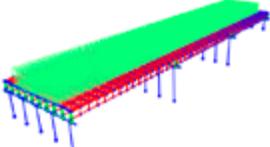
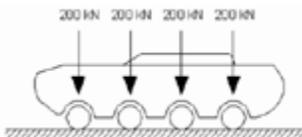
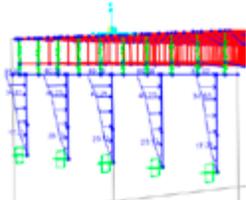
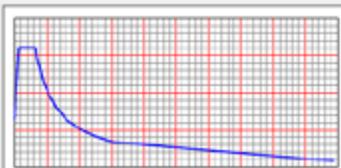
Fuente: Núñez et al. (2019)

Para realizar el análisis dinámico no lineal (time-history) se parte de registros o acelerogramas de sismos reales, preferentemente de la zona de estudio. Al no tener registros de los mismos, se emplea el programa SeismoMatch para reajustarlos. Este procedimiento se realiza insertando los acelerogramas a escalar con el espectro de diseño del municipio de Moa ya definido. Luego de procesada la información, se escogen aquellos que convergen, en este caso fueron los acelerogramas siguientes: Friuli, Hollister, Kocaeli, Loma Prieta y Northridge.

Figura 4. Acelerogramas empleados en el análisis dinámico no lineal.

Fuente: Núñez et al. (2019)

Tabla 2. Modelo de las cargas actuantes

Tipo de carga	Observación	Representación
DC: carga permanente	Baranda del tipo lineal	
	Acera del tipo área	
	Asfalto del tipo área	
LL: carga vehicular	Vehículo NK-80	
EH: empuje sísmico del suelo	Empleo de las ecuaciones de Mononobe – Okabe	
EQ: carga de sismo	A partir del espectro de diseño.	

Fuente: Núñez et al. (2019)

Teniendo en cuenta la acción de estas cargas y acciones sobre la estructura se definen las combinaciones de cargas. La investigación se basa en lo planteado al respecto en la sección 3 de la (AASHTO LRFD Bridge, 2017). Se analizan 2 combinaciones para el análisis dinámico lineal:

Combinaciones (evento extremo 1)

$$\text{Comb 1} = 1\text{DC} + 1\text{DW} + 1\text{EH} + 0.5 \text{LL} + \text{EQx} + 0.3\text{EQy}$$

$$\text{Comb 1} = 1\text{DC} + 1\text{DW} + 1\text{EH} + 0.5 \text{LL} + 0.3\text{EQx} + \text{EQy}$$

Entre las cargas permanentes (DC) se encuentran las cargas de las barandas y las aceras. Para estas combinaciones se asume lo recomendado por la NC 46:2017

de considerar la acción sísmica actuando en ambos ejes simultáneamente, al considerar el 100 % en un eje y en el otro el 30%.

Para el análisis dinámico no lineal se analizan 10 combinaciones, 2 por cada acelerogramas, actuando en el eje x o en el eje y, por separados, no se considera el análisis en la dirección de z porque el puente objeto de estudio es un puente pequeño. Ejemplo de la combinación para el acelerograma Friuli:

Combinación (evento extremo 1F)

Comb 1 = 1DC + 1DW + 1EH + 0.5 LL + Fruilli x

Comb 2 = 1DC + 1DW + 1EH + 0.5 LL + Fruilli y

Para determinar el módulo de deformación del estrato 4 se emplea la tabla de la relación entre los ensayos de Penetración Standard (SPT) y las propiedades geotécnicas de las arenas. Se considera que el relleno posee las mismas características en toda su extensión. Se obtuvieron valores para cada estrato y se realiza una ponderación de los mismos, el K_i se introduce en el programa distribuido en la línea de los pilotes (Line Springs), por tanto, su valor es multiplicado por 0.6m.

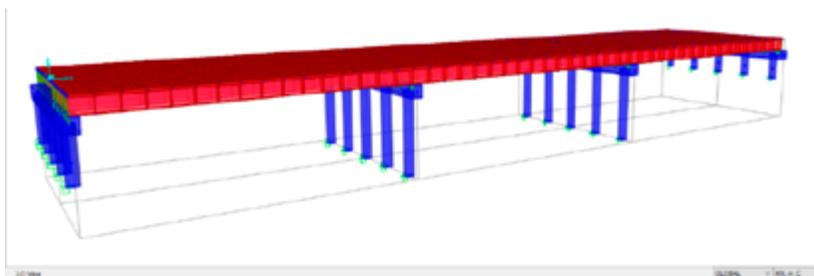
Tabla 3. Resultados del coeficiente balasto tanto horizontal como vertical

Coeficiente de balasto	Estribo 1	Pilote 1	Pilote 2	Estribo 2
K_i fuste (kN/m ²)	12932.96	21210.06	14005.26	11425.34
K_h punta (kN/m)	3696000			

Fuente: Núñez et al. (2019)

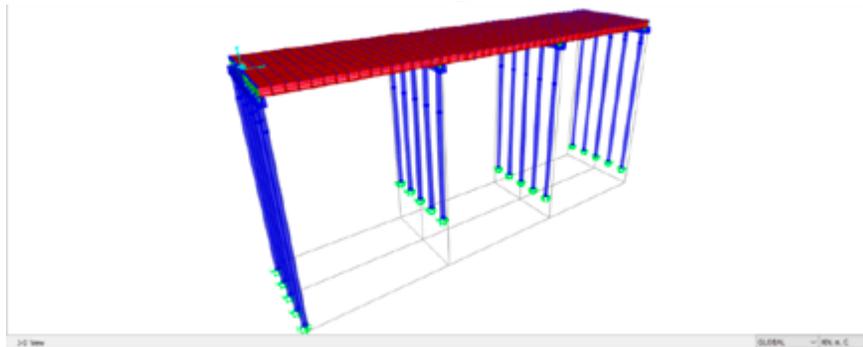
Teniendo en cuenta todas las anteriores consideraciones los modelos de cálculos se representan de la siguiente manera:

Figura 5. Modelo sin considerar la interacción suelo-estructura en CSI Bridge



Fuente: Núñez et al. (2019)

Figura 6. Modelo considerando la interacción suelo-estructura CSI Bridge

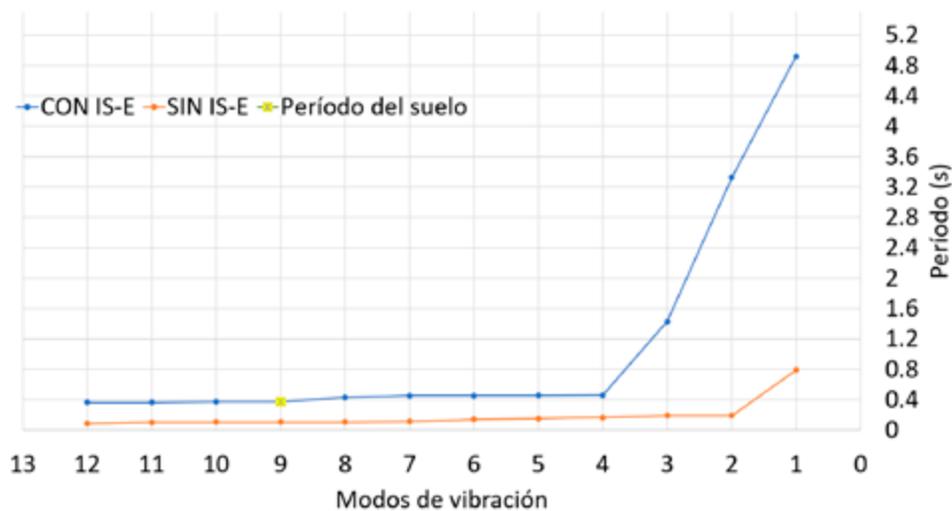


Fuente: Núñez et al. (2019)

Luego de corrido los modelos, se procede a analizar los resultados para determinar la vulnerabilidad tanto geotécnica como estructural. Los períodos de oscilación de la estructura los brinda el programa CSI Bridge y se comparan los resultados de los modelos que consideran la interacción suelo - estructura con los que no lo hacen, figura 7.

Figura 7. Variación del período de oscilación.

Variación del período de la estructura

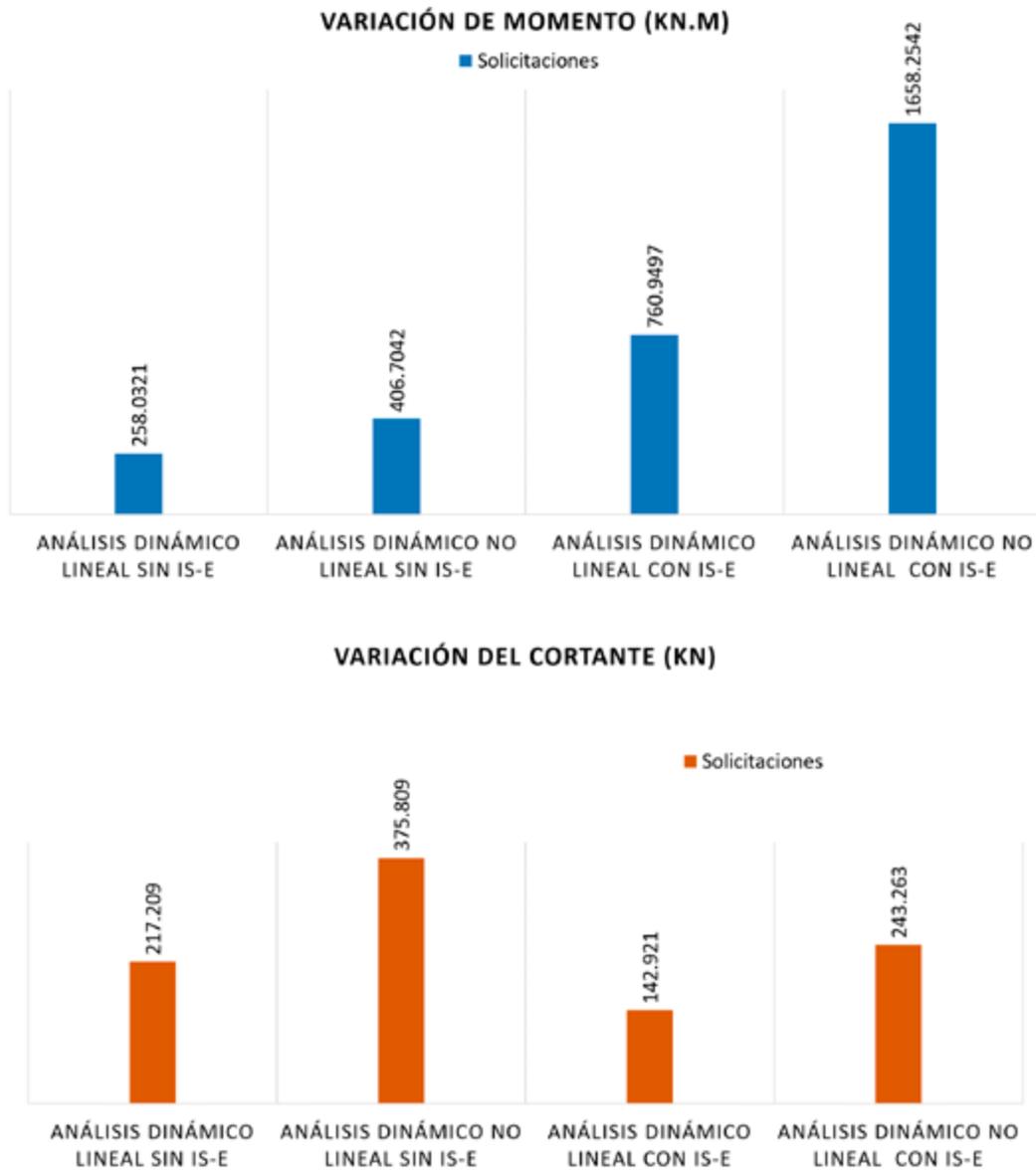


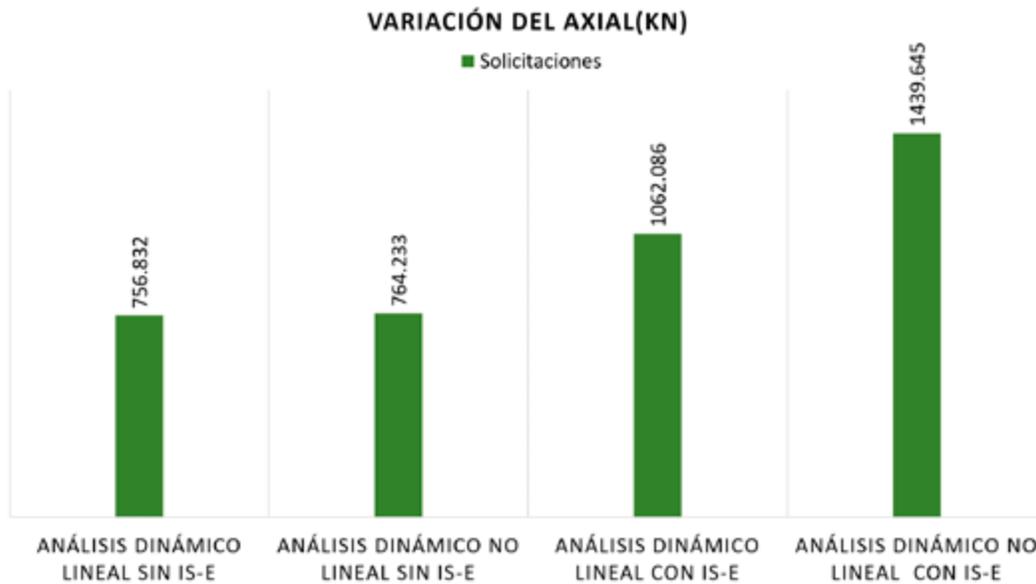
Fuente: Núñez et al. (2019)

En la figura 7 se aprecia un aumento considerable de los períodos de oscilación en los primeros modos de vibrar, debiéndose a que el puente objeto de estudio es regular, y se traduce en un aumento de la flexibilidad estructural al incorporar en el análisis la respuesta del suelo, generando a su vez mayores desplazamientos y deformaciones. Se ilustra además como el período de oscilación del suelo es aproximadamente igual al período de la estructura cuando se considera en el análisis la rigidez del mismo, para el modo de vibrar número 9, y significa que, para este modo, la estructura y el suelo entran en resonancia, aumentando por tanto sus oscilaciones hasta el punto del colapso.

Con los datos que suministra el programa se analiza como varían las solicitudes de momento, cortante y axial, los resultados son los de las solicitudes máximas para cada tipo de análisis.

Figura 8. Comportamiento de las solicitudes máximas





Fuente: Núñez et al. (2019)

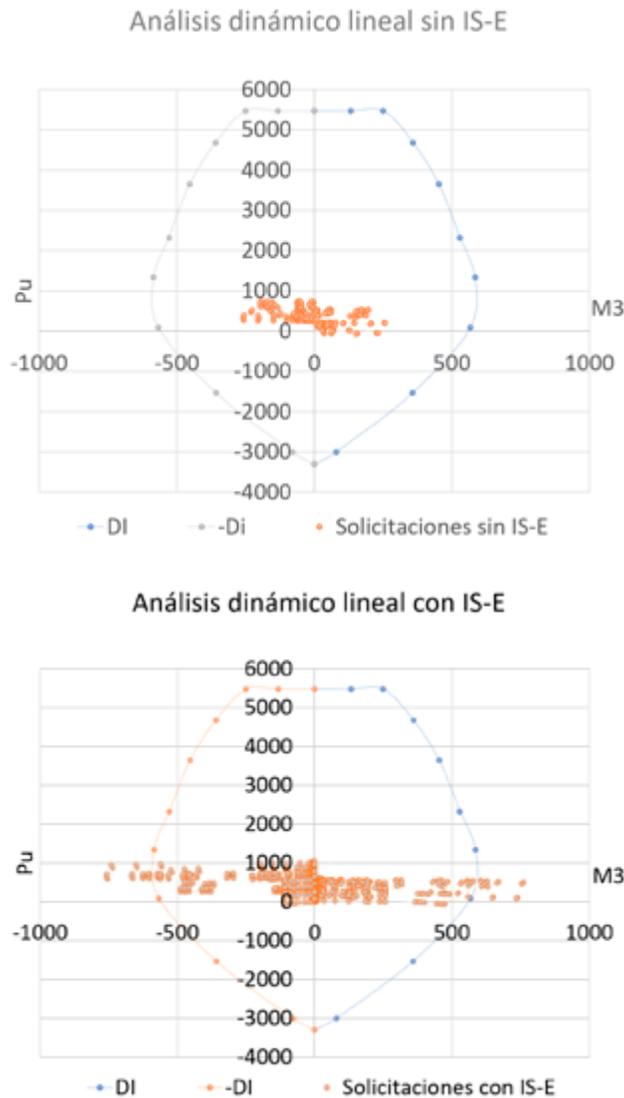
Con este comportamiento se deduce que para el momento y el axial las solicitaciones aumentan entre un análisis y otro por la precisión de considerar la carga dinámica a través de los acelerogramas, pues representan de forma más real el paso de las ondas sísmicas. Esta variación es más marcada al considerar la interacción entre el suelo y la estructura. La respuesta del suelo a la estructura es vital para conocer el verdadero comportamiento del sistema, demostrando así la importancia de considerarla en el análisis.

Para el caso del cortante se aprecia igualmente un aumento de las solicitaciones entre un análisis y otro, pero, a la vez una disminución al considerar la respuesta del suelo esto se debe a que el cortante disminuye con el aumento de la flexibilidad y la disminución de la rigidez de la estructura.

Análisis del diagrama carga-capacidad

De la aplicación del Método C y haciendo uso del software CSI Bridge V-15 se elabora el diagrama carga-capacidad con las mismas características de los materiales, sección y refuerzo de los pilotes, con el objetivo de visualizar el comportamiento de los mismos. En el diagrama fueron insertadas las solicitaciones obtenidas de los análisis y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 9. Diagrama carga-capacidad para el análisis dinámico lineal, a) Modelo sin considerar la IS-E, b) Modelo considerando la IS-E

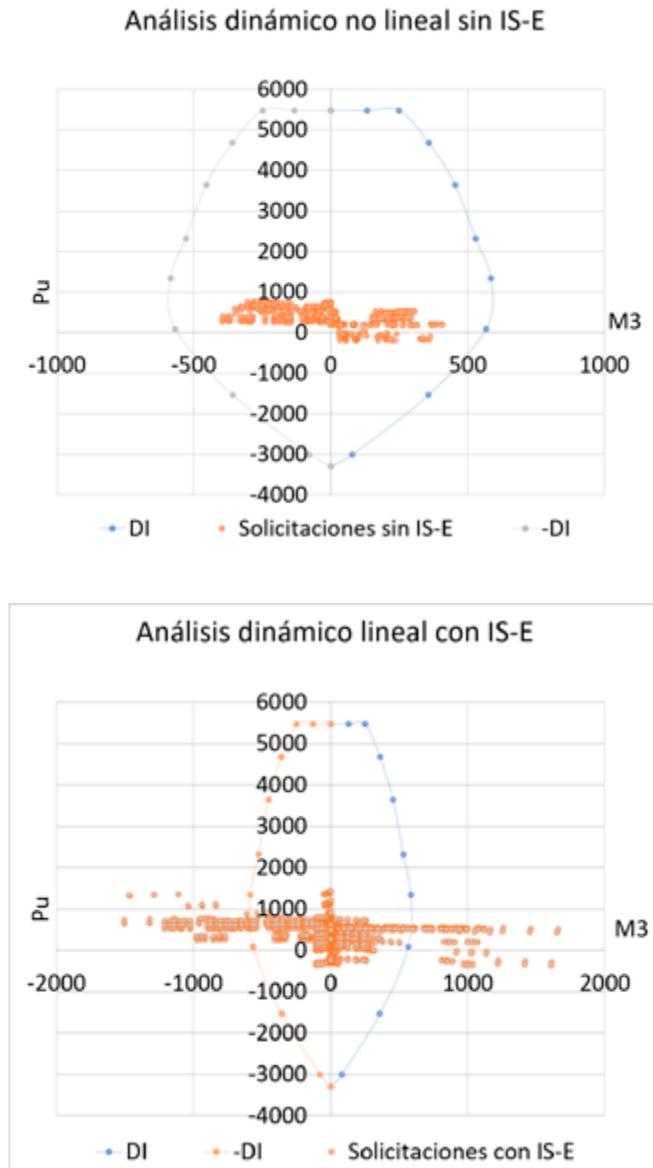


Para este primer análisis se aprecia como en el modelo a), que es lo establecido en las normas cubanas; el diseño del pilote es el correcto, no falla ante estas solicitudes. El modelo b) muestra la situación real, con el aumento de las solicitudes, el refuerzo puede llegar en ambas combinaciones a no ser suficiente ante el paso conjunto de la carga dinámica con la carga vehicular.

Se aprecia el mismo comportamiento anteriormente descrito, pero con un aumento mayor en las solicitudes, para las combinaciones donde se incluye el sismo Kocaeli actuando en el eje y sismo Friuli actuando en el eje x, (obtenido y ajustado con la herramienta Seismo Match) lo que recalca la importancia de la actualización de las normas cubanas para el diseño sismoresistente y de la consideración en el análisis, de la respuesta del suelo a la estructura.

Concordando con los autores Kramer (1996), Avilés (2003), Luco et al. (1987), Solano (2011), Danna (2013) investigaciones realizadas y las teorías planteadas referentes a los efectos de la interacción dinámica suelo - estructura.

Figura 10. Diagrama carga-capacidad para el análisis dinámico no lineal, a) Modelo sin considerar la interacción suelo - estructura b) Modelo considerando la interacción suelo - estructura.



Análisis del desplazamiento

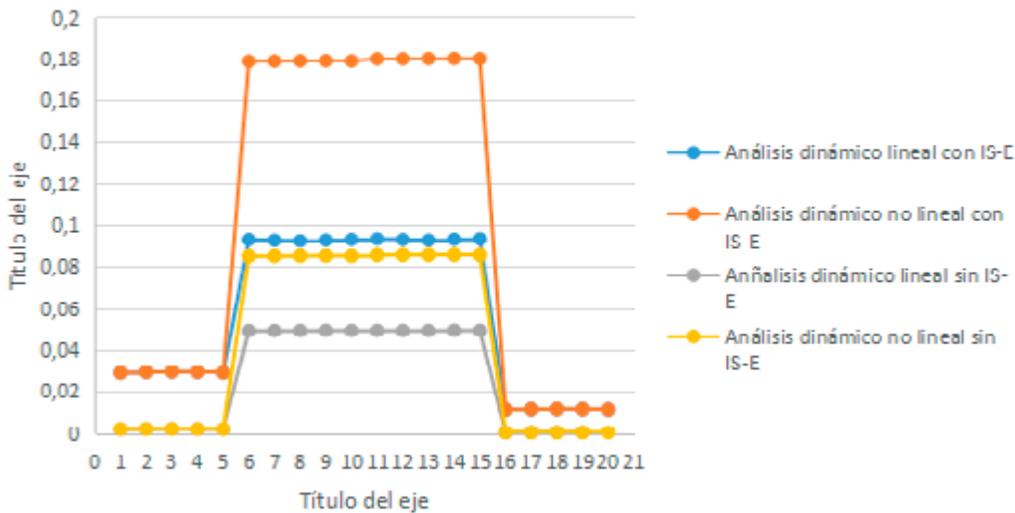
El análisis de los desplazamientos se realiza a partir de los mayores valores modulares según el eje de análisis ya sea X o Y, longitudinal o transversal respectivamente, el eje z se desprecia para el análisis del desplazamiento de los pilotes pues el movimiento en este eje se restringe a partir del empleo de

empotramientos y simples apoyos, según el modelo analizado, los resultados se muestran en la figura 11.

De este análisis se deduce que los desplazamientos en el sentido transversal del puente son superiores cuando se incluye en el análisis la interacción suelo-estructura, esto difiere en el análisis que no considera la interacción pues los desplazamientos en este sentido son menores. Las investigaciones realizadas por Danna (2013), Kramer (1996), Avilés (2003), Luco et al. (1987), han mostrado resultados similares.

Figura 11. Desplazamientos en los ejes X

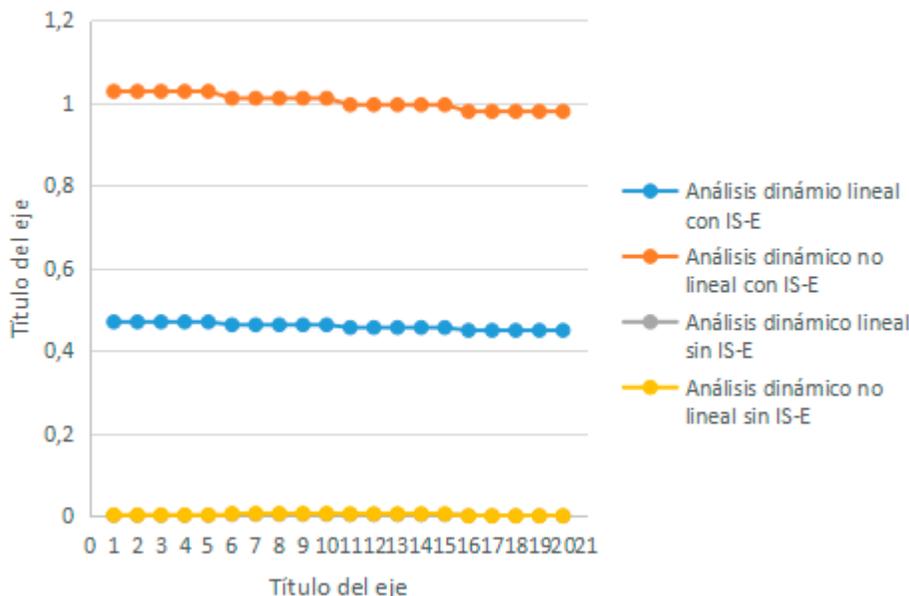
Desplazamiento en X



Fuente: Núñez et al. (2019)

Figura 12. Desplazamientos en los ejes Y

Desplazamiento en Y



Fuente: Núñez et al. (2019)

Chequeo del deslizamiento y capacidad de carga de los resortes laterales

Para realizar el análisis se parte de lo normado en el (Manual de Carreteras, 2016) en sus epígrafe 3.1003.301(3) b respecto a la resistencia al deslizamiento y el 3.1003.302 (3) b respecto a la capacidad de carga de los resortes laterales, se emplean para el cálculo las características de la capa 4, así como los resultados de los modelos que integran la interacción suelo - estructura tanto en el análisis dinámico lineal como en el dinámico no lineal a través de factores de seguridad al deslizamiento y capacidad de carga.

Tabla 3. Análisis del deslizamiento y la capacidad de carga y resistencia del suelo.

Aspectos	Deslizamiento	Observación	Capacidad de carga	Observación
Análisis dinámico lineal	$\frac{R_d}{Q_H} = \frac{571.71}{5.78} = 98.91$	No se desliza	$\frac{\sigma_{zp}}{\sigma_{zs}} = \frac{361.21}{250.39} = 1.44$	No Falla
Análisis dinámico no lineal	$\frac{R_d}{Q_H} = \frac{567.23}{11.09} = 51.13$	No se desliza	$\frac{\sigma_{zp}}{\sigma_{zs}} = \frac{361.21}{480.4} = 0.75$	Falla

Fuente: Núñez et al. (2019)

Se concluye en ambos análisis que los pilotes no se deslizan debido a que cumplen con el factor de seguridad ante solicitaciones sísmicas, la razón entre la resistencia al deslizamiento última y las solicitaciones horizontales es mayor que 1.3. Mientras que para el análisis dinámico lineal los resortes laterales si resisten por capacidad de carga, no siendo así para el análisis dinámico no lineal.

Según el período de oscilación

Los períodos de oscilación de la estructura los brinda el programa CSI Bridge y se comparan los resultados de los modelos que consideran la interacción suelo - estructura con los que no lo hacen, ver gráfico 1. A partir del promedio de las alturas del suelo donde se embebe el pilote y la velocidad de onda de corte $V_s = 180\text{m/s}$, se determina el periodo de oscilación del suelo: la estructura y el suelo entran en resonancia, aumentando por tanto sus oscilaciones hasta el punto del colapso.

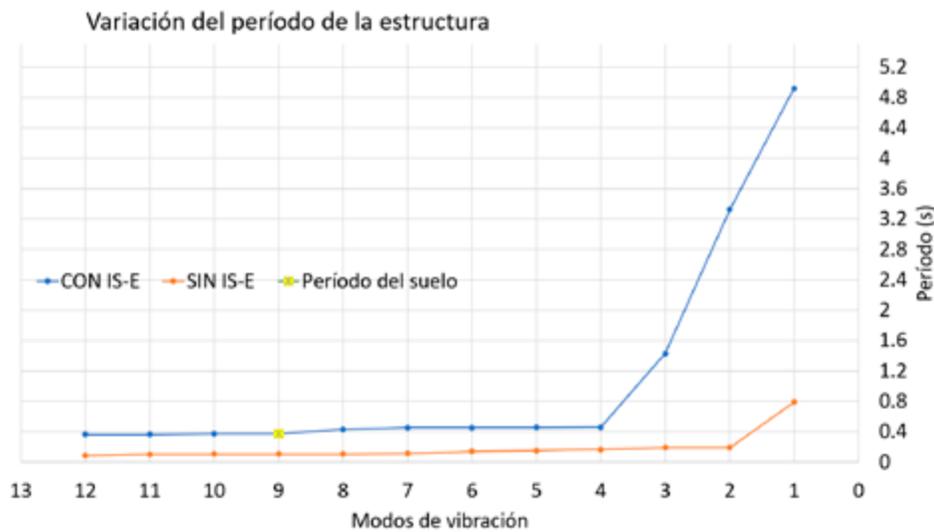
$$T_s = \frac{4 \times H}{V_s} = \frac{4 \times 16.89}{180} = 0.375 \text{ s} \quad (1)$$

Donde:

T_s : Periodo del suelo

H: altura total del estrato de suelo

V_s : Velocidad de la onda de corte a una profundidad de 30m

Figura 13. Variación del período de oscilación

Fuente: Núñez et al. (2019)

CONCLUSIONES

Al evaluar el comportamiento del puente ante cargas sísmicas considerando la interacción suelo – estructura, mediante la comparación con el modelo de base indeformable, se obtiene desde el punto de vista geotécnico que el puente es vulnerable ante la capacidad de carga del suelo solo para el análisis dinámico no lineal. Se obtiene, además, que en ambos análisis se cumple con la condición de estabilidad al deslizamiento. Desde el punto de vista estructural se evidencia un aumento de la flexibilidad del sistema en un 522% con respecto al modelo de base fija, para el primer modo de vibración.

Para el análisis lineal las solicitaciones de Momento experimentan una variación de 195% y las de axial de 40%. Los cortantes disminuyen en un 34% debido a que con la consideración de la ISE el sistema se comporta más flexible y al disminuir su rigidez disminuye esta solicitación. La demanda de carga y capacidad arroja que los cinco pilotes de la pila uno, fallan para el modelo con ISE, no siendo así para el modelo sin interacción suelo - estructura.

En el análisis no lineal se obtienen las mayores incidencias con respecto al análisis lineal, donde el momento y el axial se incrementan en un 308 y 88 % respectivamente, mientras que el cortante disminuye en un 35%. La capacidad de carga arroja que los cinco pilotes de la pila uno y dos fallan para el modelo con ISE, no siendo así para el modelo sin interacción suelo - estructura.

En cuanto a desplazamiento se aprecia un aumento significativo en la dirección transversal del puente con la consideración de la ISE para los 20 pilotes, de esta

forma se evidencia la vulnerabilidad geotécnica y estructural del puente sobre el río Cabaña en el municipio Moa considerando la interacción suelo estructura. Por todo lo anterior, se corrobora la hipótesis planteada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO LRFD Bridge. E.U: Eighth Edition. (2017)
- Alvarado, L., & Velázquez, P. (2011). Interacción estática suelo-estructura análisis con el MEF. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Avilés, J., & Pérez Rocha, L. E. (2003). Soil-structure interaction in yielding systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Buckle, I. G. I. & et al. FHWA, Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges Part 1 - Bridges, New York, 2006.
- Danna, J., & Pérez, G. (2013). Caracterización y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. *Mecánica Computacional Vol. XXXII*, 3379-3401.
- Díaz Canales, M., Hernández Zepeda, G., Sánchez Sánchez, H., García, O., Ayala, A., Mena, U., Ramírez, O. (1997). VI. 1 Análisis y diseño sísmico de estructuras especiales. Puentes. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C, Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver., México, 977-1026.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Luco, J., & Wong, H. (1987). Seismic response of foundations embedded in a layered half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Manual de Carreteras. Chile: Dirección de Vialidad de Chile. (2017).
- NC 283-2003. (2003) Densidad de Materiales Naturales, Artificiales y de Elementos de Hormigón como Cargas de Diseño.
- NC: 46-2017. (2017). NC: 46-2017 Construcciones sismorresistentes - Requisitos básicos para el diseño y construcción. Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC: 733-2009. (2009). NC: 733-2009 Carreteras-Puentes y Alcantarillas- Requisitos de diseño y Métodos de cálculos. Cuba.
- Núñez, P. M. (2019). Evaluación de la vulnerabilidad estructural y geotécnica con interacción dinámica suelo-estructura en el puente sobre el río Cabaña, Moa. Cuba.
- Pérez-Rocha L y Aviles J. (2007b), "Damage analysis of structures on elastic foundation", *Journal of structural engineering* Vol. 133, p. 1435-1461.
- Rivera Vargas, D. (2007). Cuadernos de investigación: Evaluación simplificada de la vulnerabilidad sísmica de puentes urbanos. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Solano, J. G. (2011). Evaluación del daño en edificios considerando los efectos de la interacción suelo - estructura. México.
- Rusiel, E. G. (2017). Proyecto: Puente sobre el río Cabañas. Cuba, Holguín.
- Todorovska M (2002), "Full-scale Experimental Studies of Soil-Structure Interaction", *journal of Earthquake Technology*; Article Nun. 442, Vol. 39: 139-165.

Wolf, J. P. (1985). Dynamic soil-structure interaction. Nueva Jersey.
Zepeda, O., Sánchez, T., Quass, R., Cícero, R., Ortiz, G. L., de la Cruz, S., & Meli, R. (1999). Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras. Japón: Colectivo de autores. Agencia de Cooperación Internacional de Japón. Centro Nacional de Prevención de desastres.

