



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

**EFFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN PUENTES BAJO
DIFERENTES FUENTES SÍSMICAS BASADO EN CONCEPTOS DE
DESPLAZAMIENTOS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ERNESTO PATIÑO ALTAMIRANO

TUTOR PRINCIPAL
DARIO RIVERA VARGAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

SANTA CRUZ ACATLÁN, ESTADO DE MÉXICO, FEBRERO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: M.I. Flores Corona Leonardo Emmanuel

Secretario: Dr. Chávez Cano Marcos Mauricio

1^{er} Vocal: Dr. Rivera Vargas Darío

2^{do} Vocal: Dr. López Ríos Saúl Esteban

3^{er} Vocal: Dr. Fernández Sola Luciano Roberto

TUTOR DE TESIS:

DARIO RIVERA VARGAS

FIRMA

Agradecimientos

Esta tesis no sería posible sin la ayuda que me ha brindado mucha gente por lo que quiero darle las gracias para empezar a mi familia, en especial a mis padres que siempre me han apoyado en todo lo que he emprendido, después me gustaría darle las gracias a mi tutor el Dr. Darío Rivera Vargas que ha sido mi maestro, mi tutor y un amigo que me a encausado hasta este punto, al Dr. Saul López Ríos que me apoyo durante un momento muy complicado de la maestría y que siempre nos exigió lo necesario, a todos mis sinodales que me apoyaron con sus valiosos comentarios para pulir este trabajo en cada una de sus áreas de experiencia, al Dr. Luciano Fernández Sola, al Dr. Mauricio Chávez Cano y al M.I. Leonardo Flores Corona. Durante la realización de la tesis al M.I. Gustavo Godho por ayudarme a filtrar los acelerogramas, M.I. Rodrigo Sánchez por proporcionarme los datos de la figura de sismicidad regional, al M.I. Felipe Jiménez, a mis amigos de la maestría y en otras áreas a la M.I. Lorena Vega Muños, al M.I. Alberto Cuevas y a Arely Mercado. Por último, a la gente que se dé el tiempo de leer mi tesis y quiera aportar en investigaciones futuras.

Agradezco a el CONACYT por el apoyo brindado durante la maestría.

Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica. Los datos son distribuidos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web:<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>

Resumen

Se presenta un estudio sobre un método de diseño sísmico de puentes basado en desplazamientos que tomará en cuenta los efectos de la interacción suelo estructura (ISE), cuyo objetivo radica en analizar la influencia en el diseño sísmico del efecto ISE bajo la acción de sismos de diferentes fuentes (subducción, intraplaca, cortical). Los pasos que se siguieron fueron seleccionar los acelerogramas representativos para sismos de subducción, intraplaca y corticales. Se tomó un caso representativo de un puente urbano típico de la Ciudad de México ubicado en la zona de lago, a partir del cual se realizó un análisis paramétrico, en el sentido de realizar el diseño sísmico de las columnas del puente bajo el método anteriormente descrito, a fin de evaluar los beneficios o perjuicios del efecto de ISE considerando sismos de diferentes fuentes. Cabe mencionar que estos diseños fueron validados con análisis no lineal paso a paso. Con este estudio fue factible hacer mejoras al procedimiento de diseño propuesto (Rivera, Rodríguez & Hernández, 2017). Se concluyó entre otras cosas que, para el prototipo de puente analizado el efecto de ISE suele ser benéfico en la respuesta sísmica del puente, al encontrar una menor demanda de desplazamientos sísmico efectivo en la columna del puente, lo que dio como resultado hacer diseños menos conservadores. No obstante, para este caso particular de prototipo de puente se encontró que en sismos de subducción de fuentes relativamente alejadas le beneficia el efecto de ISE, en comparación con los otros tipos de fuentes sísmicas.

Palabras clave: Puentes, interacción suelo-estructura; método basado en desplazamientos; fuentes sísmicas: cortical, subducción, intraplaca.

Abstract

A study is presented on a method of seismic design of bridges based on displacements while taking into account the effects of soil structure interaction (SSI), whose objective is to analyze the influence on the seismic design of the SSI effect under the action of earthquakes from different sources (subduction, intraplate, cortical). The steps that were followed were the selection of representative accelerograms for subduction, intraplate and cortical earthquakes. A representative case of a typical urban bridge of Mexico City located in the area of lake was taken, from which a parametric analysis was performed, in the sense of performing the seismic design of the bridge columns under the method described above, in order to assess the benefits of the effect of SSI considering earthquakes from different sources. These designs were validated with non linear step-by-step analysis. With this study it was feasible to make improvements to the proposed design procedure (Rivera, Rodríguez & Hernández, 2017). It was concluded, among other things, that the effect of SSI is usually beneficial in the seismic response of the bridge, finding a lower demand for effective seismic displacements in the column of the bridge, which resulted in less conservative design requirements. However, for this particular case of bridge prototype, it was found that in subduction earthquakes from relatively remote sources, the SSI effect benefits the design, compared to other types of seismic sources.

Keywords: Bridges, Soil-structure interaction, displacement based method, seismic sources, subduction, intraplate, cortical, earthquakes

Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| I. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Planteamiento del problema | 1 |
| 1.2 | Objetivo | 3 |
| 1.3 | Justificación y alcances | 3 |
| II. | CONCEPTOS BÁSICOS | 4 |
| 2.1 | Diseño por desempeño | 4 |
| 2.2 | Diseño por desplazamientos | 4 |
| 2.3 | Interacción suelo-estructura (ISE) | 6 |
| 2.4 | Sismicidad México | 13 |
| 2.4.1 | Sismos de subducción | 15 |
| 2.4.2 | Sismos intraplaca | 15 |
| 2.4.3 | Sismos corticales | 16 |
| III. | PROTOTIPO DE PUENTES Y SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS | 17 |
| 3.1 | Descripción del prototipo de puente | 17 |
| 3.2 | Selección de acelerogramas | 25 |
| IV. | ESTUDIO PARAMÉTRICO SOBRE EL DISEÑO SÍSMICO DE COLUMNAS DE PUENTES CON EFECTO DE ISE | 38 |
| 4.1 | Antecedentes | 38 |
| 4.2 | Procedimiento de diseño sísmico de columnas de puentes | 38 |
| 4.3 | Efecto del número de pilotes en el amortiguamiento efectivo | 50 |
| 4.4 | Análisis de sensibilidad | 52 |
| 4.5 | Análisis dinámico paso a paso | 62 |
| 4.6 | Resultados | 68 |
| 4.7 | Bondades del procedimiento de diseño sísmico | 79 |
| V. | CONCLUSIONES | 86 |
| VI. | REFERENCIAS | 89 |
| | ANEXOS | |

Lista de tablas

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 1 | Estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC, 1995)..... | 4 |
| Tabla 2 | Coeficientes de impedancia para cimentaciones superficiales (CFE, 2015)..... | 9 |
| Tabla 3 | Coeficientes de impedancia para cimentaciones con pilas (CFE, 2015)..... | 9 |
| Tabla 4 | Pesos de vagones y número de personas de vagones del metro..... | 19 |
| Tabla 5 | Valores típicos del módulo de cortante de diversos suelos (Fernandez, 2014)..... | 22 |
| Tabla 6 | Criterios ocupados para obtención de registros..... | 26 |
| Tabla 7 | Registros de acelerogramas de sismos corticales..... | 31 |
| Tabla 8 | Registros de acelerogramas de sismos de intraplaca..... | 31 |
| Tabla 9 | Registros de acelerogramas de sismos de subducción..... | 31 |
| Tabla 10 | Sismos representativos..... | 37 |
| Tabla 11 | Valores de β para sección circular..... | 46 |
| Tabla 12 | Número de pilotes y amortiguamiento efectivo..... | 50 |
| Tabla 13 | Registros ocupados para el análisis paramétrico..... | 52 |
| Tabla 14 | Diseño de columnas con sismos de subducción..... | 64 |
| Tabla 15 | Diseño de columnas con sismos intraplaca..... | 65 |
| Tabla 16 | Diseño de columnas con sismos corticales..... | 65 |
| Tabla 17 | Criterios de desempeño de columnas..... | 76 |
| Tabla 18 | Comparación de cortantes..... | 80 |
| Tabla 19 | Comparación de desplazamientos de supervivencia..... | 81 |
| Tabla 20 | Comparación de desplazamientos de servicio..... | 82 |
| Tabla 21 | Comparación de índice de desempeño de fluencia..... | 84 |
| Tabla 22 | Comparación de índice de desempeño de fractura..... | 85 |

Lista de figuras

| | | |
|---------|--|----|
| Fig. 1 | Fallas en puente causado por el sismo de Loma Prieta 1989 (Avalos, 2017)..... | 1 |
| Fig. 2 | Fallas en puente causado por el sismo de Kobe 1995 (Oller, Barbat, & Soberón, 2000)..... | 2 |
| Fig. 3 | Fallas en puente causado por el sismo de Chile 2010 (Organización Panamericana de la Salud, 2010)..... | 2 |
| Fig. 4 | Fallas en puente causado por los daños debidos al sismo del 7 de septiembre de Chiapas y colapso por el sismo del 23 de septiembre de Oaxaca(Libertad Bajo Palabra, 2017)..... | 2 |
| Fig. 5 | Estados límite de miembros y de la estructura propuestos por Priestley, <i>et al.</i> (2007)..... | 6 |
| Fig. 6 | Modelo para considerar los efectos de ISE (Aviles & Pérez-Rocha, 2004)..... | 7 |
| Fig. 7 | Placas tectónicas que inciden en México (Corona & Benavides, 2012)..... | 14 |
| Fig. 8 | Tipos de falla (Kostoglodov & Pacheco, 1999)..... | 14 |
| Fig. 9 | Zona de subducción (Salguero, 2017)..... | 15 |
| Fig. 10 | Zona de sismos intraplaca (Salguero, 2017)..... | 16 |
| Fig. 11 | Fallas cuaternarias zona centro (Cid Villegas, 2015)..... | 16 |
| Fig. 12 | Esquema en elevación del esquema de puente..... | 17 |

| | |
|---|----|
| Fig. 13 Sección cajón ocupada acotada en cm | 17 |
| Fig. 14 Sección de la columna del puente, acotada en cm | 18 |
| Fig. 15 Cimentación mixta del puente acotada en cm | 18 |
| Fig. 16 Perfil estratigráfico y sondeo de cono eléctrico en kg/cm ² y profundidad en m | 20 |
| Fig. 17 Rango de deformaciones inducidas al suelo (Solis, 2017) | 21 |
| Fig. 18 Amortiguamiento para arcillas de la ciudad de México (Flores, 2007) | 21 |
| Fig. 19 Variación de amortiguamiento crítico ζe_0 con la relación de esbeltez en cimentación con pilotes y superficial..... | 23 |
| Fig. 20 Variación de periodo efectivo con la relación de esbeltez en cimentación con pilotes y superficial | 24 |
| Fig. 21 Variación de amortiguamiento crítico efectivo ζe_0 con la relación de rigidez en cimentación con pilotes y superficial..... | 25 |
| Fig. 22 Variación de periodo efectivo con la relación de rigidez en cimentación con pilotes y superficial | 25 |
| Fig. 23 Sismos considerados para el proceso de selección de los acelerogramas para este estudio | 26 |
| Fig. 24 Estaciones que registraron sismos de subducción en la zona de lago | 27 |
| Fig. 25 Estaciones que registraron sismos intraplaca en la zona de lago o transición alta..... | 28 |
| Fig. 26 Estaciones que registraron sismos corticales en suelos blandos | 29 |
| Fig. 27 Gráfica de intensidad de Árias del registro TLHD8509 de los tres canales y los espectros de pseudoaceleración antes de cortar y después de cortar la señal | 30 |
| Fig. 28 Espectros de pseudoaceleración para el sismo 21/09/1985 registrado en la estación Tlahuac deportivo dirección a)E-W, b)N-S y c)vertical | 32 |
| Fig. 29 a) Espectro de Fourierer y cocientes de NAKAMURA en escala b) logarítmica y c) escala normal para el sismo 21/09/1985 registrado en la estación Tlahuac deportivo dirección | 33 |
| Fig. 30 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente Norte-Sur | 34 |
| Fig. 31 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente Este-Oeste | 34 |
| Fig. 32 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente vertical.... | 34 |
| Fig. 33 Curvas de sismicidad regional (Rivera & Sánchez, 2018) | 35 |
| Fig. 34 Espectros de pseudoaceleración sismo de supervivencia | 36 |
| Fig. 35 Espectros de pseudoaceleración sismo de servicio | 36 |
| Fig. 36 Diagrama de flujo método de diseño basado en desplazamiento tomando en cuenta los efectos de ISE en condición de servicio propuesto por Rivera, <i>et al</i> (2017)..... | 39 |
| Fig. 37 Diagrama de flujo método de diseño basado en desplazamiento tomando en cuenta los efectos de ISE en condición de supervivencia propuesto por Rivera, <i>et al</i> (2017)..... | 40 |
| Fig. 38 Espectro de desplazamientos estación TLHD canal 3..... | 43 |
| Fig. 39 Simplificación de modelo para un puente (Aviles & Pérez-Rocha, 2011) | 44 |
| Fig. 40 Espectro de desplazamientos estación SCT canal 2 | 46 |
| Fig. 41 Diagrama de flujo con la modificación del método de diseño | 49 |
| Fig. 42 Comparación de número de pilotes contra razón de amortiguamiento crítico efectivo ζe_0 | 52 |
| Fig. 43 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos de subducción | 53 |
| Fig. 44 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos intraplaca | 54 |

| | |
|--|----|
| Fig. 45 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos corticales | 54 |
| Fig. 46 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos de subducción . | 55 |
| Fig. 47 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos intraplaca | 55 |
| Fig. 48 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos corticales | 56 |
| Fig. 49 Comparación de cuantía longitudinal contra nivel de carga axial en sismos de subducción | 57 |
| Fig. 50 Comparación de cuantía longitudinal contra nivel de carga axial en sismos intraplaca | 57 |
| Fig. 51 Comparación de Du/Dis contra nivel de carga axial en sismos de subducción | 58 |
| Fig. 52 Comparación de Du/Dis contra nivel de carga axial en sismos intraplaca | 59 |
| Fig. 53 Comparación de Du/Dis contra nivel de carga axial en sismos corticales..... | 59 |
| Fig. 54 Comparación de $Dy/Deservicio$ contra nivel de carga axial en sismos de subducción..... | 60 |
| Fig. 55 Comparación de $Dy/Deservicio$ contra nivel de carga axial en sismos intraplaca..... | 61 |
| Fig. 56 Comparación de $Dy/Deservicio$ contra nivel de carga axial en sismos corticales | 61 |
| Fig. 57 Columna tipo para el análisis no lineal (Rivera, <i>et al.</i> 2017)..... | 62 |
| Fig. 58 Modelo de Mander..... | 63 |
| Fig. 59 Modelo de Menegotto-Pinto..... | 63 |
| Fig. 60 Columna Subh11P140, Inth11P140 y Corth11P140 con altura de 11 m y carga de 140 t | 66 |
| Fig. 61 Columna Subh9P550, Inth9P550 y Corth9P550 con altura de 9 m y carga de 550 t..... | 66 |
| Fig. 62 Columna Subh7P250, Inth7P250 y Corth7P250 con altura de 7 m y carga de 250 t..... | 67 |
| Fig. 63 Columna Subh5P350, Inth5P350 y Corth5P350 con altura de 5 m y carga de 350 t..... | 67 |
| Fig. 64 Columna Subh3P450, Inth3P450 y Corth3P450 con altura de 3 m y carga de 450 t..... | 67 |
| Fig. 65 Desempeño de fluencia para sismos de supervivencia ISE y EM | 68 |
| Fig. 66 Desempeño de aplastamiento de concreto para sismos de supervivencia ISE y EM..... | 68 |
| Fig. 67 Desempeño de fracturamiento de acero para sismos de supervivencia ISE y EM..... | 69 |
| Fig. 68 Desempeño de fluencia para sismos de servicio ISE y EM | 69 |
| Fig. 69 Desempeño de aplastamiento de concreto para sismos de servicio ISE y EM..... | 69 |
| Fig. 70 Desempeño de fracturamiento de acero para sismos de servicio ISE y EM..... | 70 |
| Fig. 71 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo de subducción..... | 70 |
| Fig. 72 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo de subducción..... | 71 |
| Fig. 73 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo de subducción..... | 71 |
| Fig. 74 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo de subducción..... | 71 |
| Fig. 75 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo de subducción..... | 72 |
| Fig. 76 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo intraplaca..... | 72 |
| Fig. 77 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo intraplaca..... | 72 |
| Fig. 78 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo intraplaca..... | 73 |
| Fig. 79 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo intraplaca..... | 73 |
| Fig. 80 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo intraplaca..... | 73 |
| Fig. 81 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo cortical | 74 |
| Fig. 82 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo cortical | 74 |
| Fig. 83 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo cortical | 75 |
| Fig. 84 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo cortical | 75 |
| Fig. 85 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo cortical | 75 |
| Fig. 86 Gráfica de barras con la relación entre desplazamientos máximos relativos del análisis no lineal con base empotrada y con ISE..... | 79 |
| Fig. 87 Comparación de cortantes actuantes en el análisis no lineal y el método de diseño..... | 80 |

| | |
|--|----|
| Fig. 88 Comparación de desplazamientos de supervivencia en el análisis no lineal y el método de diseño | 82 |
| Fig. 89 Comparación de desplazamientos de servicio en el análisis no lineal y el método de diseño | 83 |
| Fig. 90 Espectros de respuesta de desplazamientos..... | 87 |
| Fig. 91 Histograma de cociente de periodo empotrado y periodo con ISE (T_e/T_{cr}) | 88 |

Lista de Anexos

- Anexo 1 Clasificación de registros
- Anexo 2 Programa de diseño con Python 3
- Anexo 3 Parámetros de diseño

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los criterios para el diseño sísmico de puentes de concreto reforzado han mostrado deficiencias durante la ocurrencia de grandes terremotos, tales como: Loma prieta (1989), Kobe (1995), Wenchuan (2008), Chile (2010), Chiapas (2017), entre otros. Uno de los elementos estructurales en este tipo de obras de infraestructura que suelen ser muy vulnerables son las columnas. En las siguientes figuras se observan los daños que han causado la mayoría de estos sismos en puentes.



Fig. 1 Fallas en puente causado por el sismo de Loma Prieta 1989 (Avalos, 2017)



Fig. 2 Fallas en puente causado por el sismo de Kobe 1995 (Oller, Barbat, & Soberón, 2000)

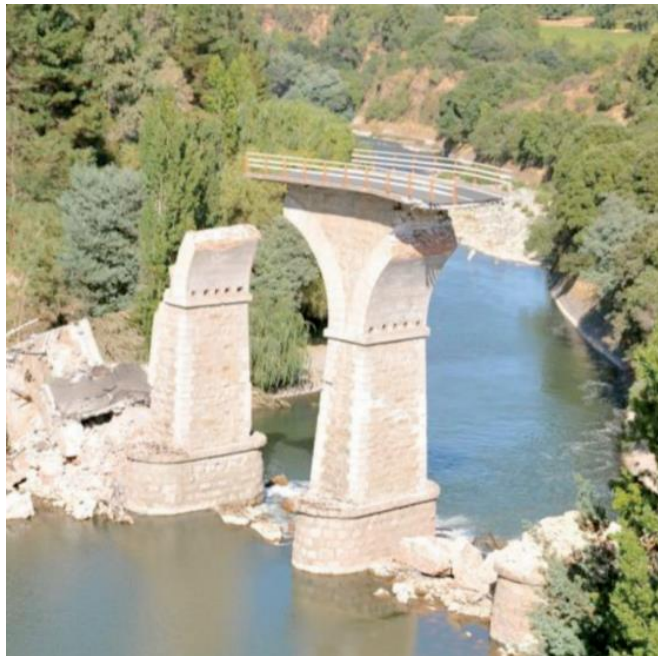


Fig. 3 Fallas en puente causado por el sismo de Chile 2010 (Organización Panamericana de la Salud, 2010)



Fig. 4 Fallas en puente causado por los daños debidos al sismo del 7 de septiembre de Chiapas y colapso por el sismo del 23 de septiembre de Oaxaca(Libertad Bajo Palabra, 2017)

Por lo anterior, se ha visto la necesidad de mejorar los criterios de diseño, al pasar de un diseño elástico a un diseño plástico en las columnas de los puentes, en donde se tenga un mejor control del daño al momento de buscar cierta disipación de energía. En este sentido, el método de diseño por desempeño ha demostrado ser una buena alternativa para satisfacer los objetivos de diseño de los puentes, en particular al incorporar conceptos basados en desplazamientos.

El diseño sísmico de columnas de puentes de concreto reforzado basado en desplazamientos, permite correlacionar la respuesta sísmica de la estructura con el nivel de daño de ésta, dado que el daño se puede observar con la deformación de los materiales los cuales a su vez se vinculan con los desplazamientos que experimenta la estructura. De esta manera se han propuesto procedimientos de diseño sísmico de columnas de puentes bajo este enfoque, como se describen ampliamente en los trabajos de Priestley (2000) y Rivera (2005).

Ahora bien, el diseño sísmico basado en desplazamientos no se ha combinado del todo con los efectos de interacción suelo-estructura (ISE), lo que podría resultar interesante, si se tiene en consideración el diseño sísmico de puentes en zonas de suelo blando como la Ciudad de México, en donde, por la naturaleza de las arcillas, se manifiesta tanto la amplificación de ondas como la ISE inercial. Por lo que el efecto de ISE en puentes puede conducir a respuestas estructurales mayores o menores, a consecuencia de una modificación en el periodo fundamental, el amortiguamiento y la ductilidad lo cual depende de la posición de los periodos resonantes dentro del espectro de respuesta (Rivera, *et al.* 2017).

En la literatura no abundan estudios que valoren el beneficio o perjuicio de la ISE en la respuesta sísmica de los puentes de la zona lacustre de la Ciudad de México, mucho menos su vínculo con el diseño sísmico basado en desplazamientos, se prevé que se puede obtener una menor demanda sísmica de desplazamiento efectivos y en consecuencia obtener diseños más racionales y confiables.

1.2 Objetivo

Analizar la respuesta dinámica de un prototipo de puente urbano de concreto reforzado ubicado en la zona de suelo blando de la Ciudad de México, sometido a excitaciones sísmicas de diferentes fuentes (subducción, intraplaca y cortical) considerando los efectos de interacción suelo-estructura, con objeto de estudiar las bondades en el diseño sísmico de las columnas basado en conceptos de desplazamientos.

1.3 Justificación y alcances

Existen pocos procedimientos de diseño sísmico de puentes basada en desplazamientos que consideren el efecto de interacción suelo-estructura. En consecuencia, se tomó como referencia el procedimiento desarrollado por Rivera (2005) y Rivera *et al.* (2017) para hacerles modificaciones, incorporando los efectos de ISE. La investigación se limitó al análisis de un puente urbano en cantiléver de concreto reforzado, con columnas circulares, típico del Sistema de Transporte Colectivo (metro) considerando un par de acelerogramas por cada fuente sísmica (subducción, intraplaca y cortical).

II. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Diseño por desempeño

Los conceptos básicos de diseño por desempeño empiezan a desarrollarse al plantear el problema del diseño sísmico de una forma más racional. En los enfoques de diseño límite, normalmente solo se evalúa un movimiento de terreno para la condición de prevención del colapso, pero el diseño para este sismo no necesariamente cubre niveles de daño aceptables para sismos con otras intensidades. Por eso se establecen ciertos límites de desempeño que no se deben de exceder. El desempeño se cuantifica en términos de daño sufrido por un evento perturbador. El comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) propone cuatro niveles de desempeño: operación completa, operacional, seguridad, prevención de colapso y en la tabla 1 se describen estos niveles de desempeño.

Tabla 1 Estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC, 1995)

| Nivel de desempeño | Estado de daño | Características principales |
|---------------------------|-----------------------|---|
| Operación completa | Despreciable | Las instalaciones continúan prestando servicios y funciones después del sismo |
| Operacional | Ligero | Las instalaciones esenciales continúan en servicio y las no esenciales pueden sufrir interrupciones de inmediata recuperación |
| Seguridad | Moderado | La estructura sufre daños, pero permanece estable. Seguridad de ocupantes. Algunos elementos no estructurales pueden dañarse |
| Prevención de colapso | Severo | Próximo a colapsarse estructuralmente. Falla de elementos no estructurales y seguridad de ocupantes comprometida |
| Colapso | Completo | Colapso estructural |

2.2 Diseño por desplazamientos

En un diseño basado directamente en los desplazamientos se intenta tomar en cuenta la respuesta inelástica de la estructura con el desplazamiento pico y se diseña una estructura para que alcance un límite de desempeño deseado, lo que provoca que la estructura tenga un riesgo uniforme. Para relacionar el desempeño de la estructura con su respuesta, se suele emplear límites de desempeño a nivel sección y elemento estructural. Se pueden ocupar límites de sección y límites de la estructura. A continuación, se describen brevemente estos límites (Priestley, *et al.*, 2007).

Límites de sección de concreto reforzado

- *Límite de agrietamiento.* Este límite en el concreto se presenta cuando se observan los primeros cambios significativos de rigidez por el agrietamiento a tensión del concreto y no se debe de exceder este límite en diseños elásticos; por el contrario, en un diseño inelástico es sencillo que un sismo exceda este límite.
- *Primera fluencia.* Este límite también representa un cambio significativo en la rigidez por la fluencia del acero de refuerzo a tensión y es importante para definir una curva de histéresis adecuada.
- *Desprendimiento del recubrimiento.* Cuando se llega a esta condición se puede llegar a perder repentinamente resistencia en secciones poco confinadas o con cargas axiales grandes. Se puede considerar que esta condición se presenta cuando el concreto alcanza una deformación unitaria a compresión de $\epsilon=0.004$. A partir de este límite se requiere tomar acciones remediales.
- *Pandeo del refuerzo longitudinal. Dependiendo de las condiciones de esbeltez del acero a compresión y su restricción al pandeo.* Cuando se llega a este estado es necesario cambiar las secciones.
- *Límite último.* Este límite corresponde a eventos físicamente críticos y en este estado los elementos ya no pueden tomar cargas. En una gráfica de capacidad se podría definir este estado cuando la resistencia máxima de cargas disminuye un 20%.

Límites estructurales

- *Límite de servicio.* Este límite corresponde a la operación total y no se necesitan acciones remediales. En este estado no debe de ocurrir desprendimiento del concreto y no debe de haber daños significativos en los elementos no estructurales.
- *Control de daño.* En este límite se considera que la reparación de la estructura tiene un costo de reparación aceptable; este costo debe de ser menor que el costo de remplazo. En este límite no deben de ocurrir daños graves en las secciones por ejemplo pandeo del refuerzo longitudinal, pero sí puede haber desprendimiento del recubrimiento del concreto. También se debe de cuidar que los costos del contenido de la estructura no sean excesivos en especial cuando el contenido sea 2 o 3 veces el costo la estructura.
- *Supervivencia.* Se debe de asegurar que superando el límite de control de daño la estructura tenga capacidad para que en un evento extraordinario la estructura no falle y no se pierdan vidas.

Para relacionar los niveles de desempeño propuestos por el SEAOC con los límites de sección y estructural se debe de conocer la estructura que se está diseñando y dependiendo del método correlacionarlos para que se cumpla el objetivo de diseño. En la figura 5 se ilustran las gráficas que representan los estados límites a nivel sección y a nivel estructural.

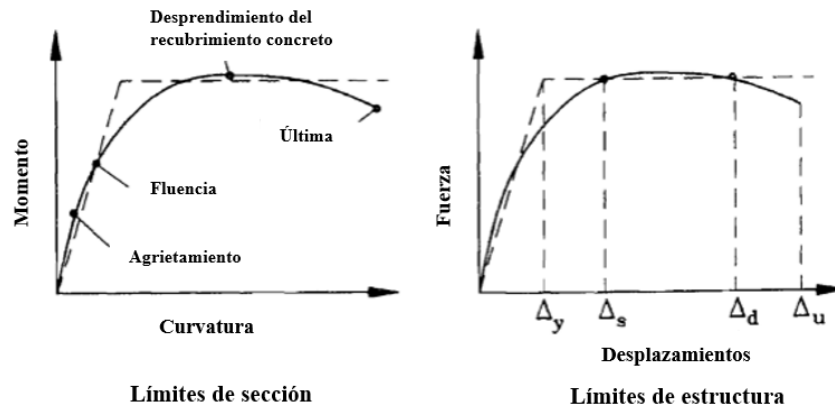


Fig. 5 Estados límite de miembros y de la estructura propuestos por Priestley, et al. (2007)

2.3 Interacción suelo-estructura (ISE)

La interacción suelo-estructura se refiere a la influencia de las condiciones del sitio en la respuesta estructural, que depende de las características de la estructura y el suelo de soporte. Cuando se desplantan estructuras en suelos blandos, la interacción dinámica entre el suelo y la estructura adquiere relevancia significativa. La interacción suelo-estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad de éste ante la excitación sísmica (Aviles & Pérez-Rocha, 2004). La ISE se puede dividir en dos partes: inercial y cinemática.

La interacción inercial se refiere al efecto de la inercia y flexibilidad del sistema controlado por el contraste de rigideces entre el suelo y la estructura. La interacción cinemática tiene que ver con la incidencia de las ondas y la modificación que la cimentación genera en ellas y depende de la geometría de la cimentación, estratigrafía del suelo y las ondas sísmicas. Para saber si los efectos de ISE inercial se deben de tomar en cuenta se ocupa la siguiente relación (CFE, 2015).

$$\frac{T_{e0}}{T_s} \frac{H_s}{H_{e0}} < 2.5 \quad (1)$$

donde,

- H_{e0} altura efectiva de la estructura supuesta con base rígida
- H_s espesor total del estrato de terreno equivalente
- T_{e0} periodo fundamental de la estructura supuesta con base rígida
- T_s periodo dominante del terreno equivalente

Resortes y amortiguadores equivalentes del suelo

Para evaluar los efectos de interacción se pueden ocupar resortes y amortiguadores equivalentes, para facilitar el problema se pueden ocupar valores constantes que dependen de la frecuencia dominante del sistema, para esto se tienen que tomar en cuenta: la profundidad de desplante de la cimentación, el perfil estratigráfico, entre otros parámetros. La rigidez (Figura 6) K_m se puede representar como un resorte lineal que representa la rigidez y la inercia del suelo, el amortiguamiento y la geometría del suelo se representan como un amortiguamiento viscoso C_m (Aviles & Pérez-Rocha, 2004), dados por:

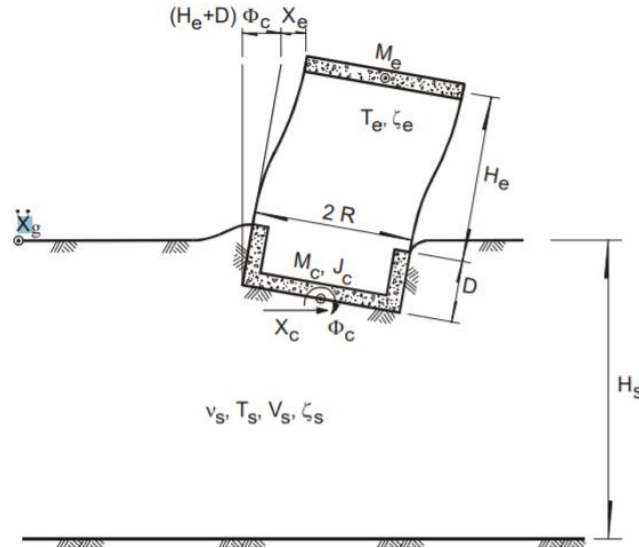


Fig. 6 Modelo para considerar los efectos de ISE (Aviles & Pérez-Rocha, 2004)

$$K_m = K_m^0(k_m - 2\zeta\eta c_m) \quad (2)$$

$$C_m = K_m^0(\eta c_m - 2\zeta\eta k_m)/\omega \quad (3)$$

donde,

- K_m^0 rigidez estática
- k_m coeficiente de rigidez
- c_m coeficiente de amortiguamiento
- ζ razón de amortiguamiento del suelo
- η frecuencia adimensional del suelo
- m modos de vibrar (horizontal, vertical, rotación)

Para conocer el trabajo dinámico en conjunto de una cimentación con cajón y pilotes normalmente se dividen los efectos que tiene su cajón de cimentación y los efectos de los pilotes por eso se van a detallar por separado.

Parámetros de frecuencia

Frecuencia normalizada, cuando las frecuencias son menores que la frecuencia fundamental del suelo los valores de amortiguamiento son muy bajos y el amortiguamiento por radiación es nulo. Con la siguiente expresión se calculan.

Para cimentaciones someras

$$\eta_{h,v,r} = \frac{\omega R_{h,v,r}}{V_s} \quad (4)$$

Para pilas

$$\eta = \frac{\omega d}{V_s} \quad (5)$$

donde,

| | |
|----------|---|
| ω | frecuencia angular de la excitación |
| V_s | velocidad de onda de cortante del suelo |
| d | diámetro de la pila |

Frecuencias críticas del estrato de suelo, son las frecuencias fundamentales en ondas de cortante o compresión propagándose verticalmente, según las oscilaciones de la cimentación. Principalmente las oscilaciones de translación horizontal inducen ondas S y las de cabeceo ondas P.

Cimentaciones someras

$$\eta_s = \frac{\pi R_h}{2H_s} \quad (6)$$

$$\eta_p = \sqrt{\frac{2(1 - \nu_s)}{1 - 2\nu_s}} \frac{\pi R_r}{2H_s} \quad (7)$$

donde,

| | |
|---------|-------------------------------------|
| ν_s | frecuencia angular de la excitación |
| R_h | radio equivalente del área |
| R_r | radio equivalente de la inercia |

Cimentaciones con pilas

$$\eta_s = \frac{\pi d}{2H_s} \quad (8)$$

$$\eta_p = \frac{3.4\eta_s}{\pi(1 - \nu_s)} \quad (9)$$

En las tablas 2 y 3 se resumen los coeficientes de impedancia tanto para cimentaciones superficiales como para cimentaciones profundas a base de pilas, de acuerdo con la CFE (2015).

Tabla 2 Coeficientes de impedancia para cimentaciones superficiales (CFE, 2015)

| Modo de vibrar | Coefficiente de rigidez cimentaciones superficiales | Coefficiente de amortiguamiento para cimentaciones superficiales |
|----------------|---|---|
| Horizontal | $k_h = 1$ | $c_h = \frac{0.65\zeta_s\eta_{hs}}{1 - (1 - 2\zeta_s)\eta_{hs}^2} \text{ si } \eta_{hs} = \frac{\eta_h}{\eta_s} \leq 1$ $c_h = 0.576 \text{ si } \eta_{hs} = \frac{\eta_h}{\eta_s} > 1$ |
| Vertical | $k_v = 1$ | $c_v = 0 \text{ si } \eta_v < \eta_p$ $c_v = 0.85 \frac{1 + 1.85(1 - v_s)D/R_v}{1 + 0.5D/R_v} \text{ si } \eta_v \geq \eta_p$ |
| Cabeceo | $k_r = 1 - 0.2\eta_r \text{ si } \eta_r \leq 2.5$ $k_r = 0.5 \text{ si } \eta_r > 2.5 \text{ y } v_s \leq 1/3$ $k_r = 1 - 0.2\eta_r \text{ si } \eta_r > 2.5$ $\text{ y } v_s \geq 0.45$ <p>Interpolar linealmente para $\frac{1}{3} < v_s < 0.45$</p> | $c_r = \frac{0.5\zeta_s\eta_{rp}}{1 - (1 - 2\zeta_s)\eta_{rp}^2} \text{ si } \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} \leq 1$ $c_r = \frac{0.3\eta_r^2}{1 + \eta_r^2} \text{ si } \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} > 1$ |

Tabla 3 Coeficientes de impedancia para cimentaciones con pilas (CFE, 2015)

| Modo de vibrar | Coefficiente de rigidez para pilas | Coefficientes de rigidez para pilas |
|----------------|--|--|
| Horizontal | $k_h = 1$ | $c_h = 0.8\zeta_s \text{ si } \eta \leq \eta_s$ $c_h = 0.8\zeta_s + 0.175\eta \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.17} \text{ si } \eta > \eta_s$ |
| Vertical | $k_v = 1 \text{ si } \frac{L}{d} < 15$ $k_v = 1 + \sqrt{\eta} \text{ si } \frac{L}{d} \geq 15$ <p>Interpolar linealmente para $15 \leq \frac{L}{d} < 50$</p> | $c_v = \zeta_s \text{ si } \eta \leq \eta_p$ $c_v = \frac{0.413}{1 + v_s} \left(\frac{L}{d}\right)^{0.33} \left(1 - e^{\left(\frac{E_p}{E_s}\right)\left(\frac{L}{d}\right)^{-2}}\right) \eta^{0.8}$ <p>si $\eta > 1.5\eta_p$ Interpolar linealmente para $\eta_p < \eta \leq 1.5\eta_p$</p> |
| Cabeceo | $k_r = 1$ | $c_r = 0.25\zeta_s \text{ si } \eta \leq \eta_s$ $c_r = 0.25\zeta_s + 0.056 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.2} \eta \text{ si } \eta > \eta_s$ |

Rigidez estática

Cimentación superficial

Para el cálculo de la rigidez dinámica se debe de calcular la rigidez estática y las expresiones que se ocupan en el manual de CFE (CFE, 2015) y en las NTC-Sismos (2017) consideran una cimentación circular equivalente con determinado empotramiento, por ello en las siguientes ecuaciones se ocupan radios equivalentes del área y la inercia del cajón.

$$R_h = R_v = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (10)$$

$$R_r = \sqrt[4]{\frac{4I}{\pi}} \quad (11)$$

donde,

A área en planta de la cimentación
 I inercia en el sentido de análisis

Las rigideces estáticas se obtienen con las siguientes expresiones.

$$K_h^0 = \frac{8G_s R_h}{2 - \nu_s} \left(1 + \frac{R_h}{2H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{3R_h}\right) \left(1 + \frac{5D}{4H_s}\right) \quad (12)$$

$$K_V^0 = \frac{4G_s R_V}{1 - \nu_s} \left(1 + 1.28 \frac{R_V}{H_s}\right) \left(1 + \frac{D}{2R_V}\right) \left[1 + \left(0.85 - 0.28 \frac{D}{R_V}\right) \frac{D/H_s}{1 - D/H_s}\right] \quad (13)$$

$$K_r^0 = \frac{8G_s R_r^3}{3(1 - \nu_s)} \left(1 + \frac{R_r}{6H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{R_r}\right) \left(1 + 0.71 \frac{D}{H_s}\right) \quad (14)$$

donde,

K_h^0 rigidez estática en el modo horizontal
 K_V^0 rigidez estática en el modo vertical
 K_r^0 rigidez estática en el modo de cabeceo
 G_s módulo de rigidez a cortante del suelo
 ν_s módulo de poisson del suelo
 D profundidad de desplante del cajón de cimentación
 H_s profundidad al estrato profundo

Cimentación con pilas

Para que apliquen las siguientes ecuaciones los pilotes tienen que ser de fricción y flexibles, cumpliendo con la siguiente desigualdad (Aguilar & Aviles, 2003):

$$L_p > L_c \quad (15)$$

$$L_c = 2d \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.25} \quad (16)$$

$$K_h^0 = dE_s \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.21} \quad (17)$$

$$K_v^0 = 1.9dE_s \left(\frac{L_p}{d}\right)^{0.67} \quad (18)$$

$$K_r^0 = 0.15d^3 E_s \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.75} \quad (19)$$

donde,

L_p longitud de la pila
 E_p módulo de elasticidad de la pila
 E_s módulo de elasticidad del suelo

Efectos de grupo

Para conocer el efecto de grupo de los pilotes se requiere conocer el efecto que tiene un pilote sobre los demás y para eso se ocupa el procedimiento propuesto por Poulos como cita Aguilar (2010).

La expresión aproximada para conocer la vibración vertical de un pilote en la respuesta de otro pilote se evalúa con el factor de interacción dinámica propuesta por Dobry y Gazetas (Dobry & Gazetas, 1988) para la función de la interacción ante vibraciones verticales se representa con la siguiente expresión:

$$\alpha_v = \left(\frac{S}{r_0}\right)^{-0.5} e^{-\zeta\omega S/V_s} e^{-i\omega S/V_s} \quad (20)$$

donde,

S separación entre pilotes
 r_0 radio del pilote

Para vibraciones horizontales el factor de interacción dinámico no solo depende de la separación entre pilas y la frecuencia angular si no también del ángulo entre los pilotes y la dirección de la fuerza aplicada. Pero con evidencia de Gazetas y Dobry (1988) con una fuerza aplicada a 90° la pila solo es afectada por ondas S, que están en fase con la velocidad de onda de cortante y con un ángulo de 0° la pila es afectada por ondas de extensión a compresión P, propagadas en fase a una velocidad aproximada a la velocidad de Lysmer, en la siguiente ecuación se presenta el cálculo de esta velocidad.

$$V_L = \frac{3.4V_s}{\pi(1 - \nu_s)} \quad (21)$$

Por lo anterior se puede decir que el factor de interacción dinámico a 90° es casi igual al factor vertical y el factor horizontal a cero grados es casi igual al factor dinámico vertical con la velocidad de Lysmer

$$\alpha_h (90^\circ) = \left(\frac{S}{r_0}\right)^{-0.5} e^{-\zeta\omega S/V_L} e^{-i\omega S/V_L} \quad (22)$$

$$\alpha_h (0^\circ) = \alpha_v \quad (23)$$

Para conocer el factor de interacción dinámico horizontal a cualquier ángulo entre la línea de dos pilotes y la dirección de la fuerza horizontal aplicada. Se puede hacer una buena aproximación con la siguiente expresión.

$$\alpha_h (\theta^\circ) = \alpha_h (0^\circ)\cos^2\theta + \alpha_h (90^\circ)\sin^2\theta \quad (24)$$

Se realizan matricialmente los factores de interacción dinámico para conocer la influencia que tienen entre si las pilas de fricción.

$$\alpha_{h,v} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & 1 & \dots & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Y para conocer el comportamiento global se pueden ocupar las siguientes ecuaciones:

$$v_{h,v} = \alpha_{h,v}^{-1} \quad (26)$$

$$K_h^g = K_h^0 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_h(i,j) \quad (27)$$

$$K_r^g = K_v^0 \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sum_{j=1}^N \varepsilon_j v_v(i,j) \quad (28)$$

Por último, se realiza la suma de la cimentación con pilotes y la cimentación superficial.

$$K_{h,r,v} = K_{h,r,v \text{ superficial}} + K_{h,r,v \text{ profunda}} \quad (29)$$

$$C_{h,r,v} = C_{h,r,v \text{ superficial}} + C_{h,r,v \text{ profunda}} \quad (30)$$

donde,

| | |
|---------------------------------|---|
| $K_{h,r,v}$ | rigidez (horizontal o rotacional o vertical) del conjunto de la cimentación |
| $K_{h,r,v \text{ superficial}}$ | rigidez de la cimentación superficial |
| $K_{h,r,v \text{ profunda}}$ | rigidez de la cimentación profunda |
| $C_{h,r,v}$ | amortiguamiento (horizontal o rotacional o vertical) del conjunto de la cimentación |
| $C_{h,r,v \text{ superficial}}$ | amortiguamiento de la cimentación superficial |
| $C_{h,r,v \text{ profunda}}$ | amortiguamiento de la cimentación profunda |

Periodo y amortiguamiento efectivo

Se puede obtener un periodo efectivo de la estructura despreciando la masa y el momento de inercia de la cimentación con las siguientes expresiones:

$$\tilde{T}_e = \sqrt{T_e^2 + T_h^2 + T_r^2} \quad (31)$$

$$T_h = 2\pi \left(\frac{M_{e0}}{K_h} \right)^{1/2} \quad (32)$$

$$T_r = 2\pi \left(\frac{M_{e0}(H_{e0} + D)^2}{K_r} \right)^{1/2} \quad (33)$$

donde,

| | |
|---------------|--|
| \tilde{T}_e | periodo efectivo del sistema acoplado suelo-estructura |
| T_e | periodo fundamental de la estructura |

| | |
|-------|---|
| T_h | periodo natural de la estructura supuesta infinitamente rígida y cuya base solo puede trasladarse |
| T_r | periodo de la estructura supuesta infinitamente rígida y cuya base solo puede rotar |
| K_h | rigidez lateral de la cimentación |
| K_r | rigidez de rotación de la cimentación |

El cálculo de este periodo debe de hacerse de forma iterativa con el valor de la rigidez estática como primera aproximación, esta iteración converge en la mayoría de los casos en la tercera iteración.

De igual manera despreciando la masa y la inercia de la cimentación se obtiene un amortiguamiento equivalente que incluye el amortiguamiento por radiación y por disipación con las ecuaciones siguientes:

$$\tilde{\zeta}_{e0} = \zeta_{e0} \left(\frac{T_e}{\tilde{T}_e} \right)^3 + \frac{\zeta_h}{1 + 2\zeta_h^2} \left(\frac{T_h}{\tilde{T}_e} \right)^2 + \frac{\zeta_r}{1 + 2\zeta_r^2} \left(\frac{T_r}{\tilde{T}_e} \right)^2 \quad (34)$$

$$\zeta_h = \frac{\tilde{\omega}_{e0} C_h}{2K_h} \quad (35)$$

$$\zeta_r = \frac{\tilde{\omega}_{e0} C_r}{2K_r} \quad (36)$$

donde,

| | |
|-----------------------|--|
| $\tilde{\zeta}_{e0}$ | amortiguamiento efectivo del modo fundamental de la estructura |
| ζ_{e0} | amortiguamiento asociado al modo fundamental de la estructura |
| ζ_h | amortiguamiento del suelo en el modo de traslación de la cimentación |
| ζ_r | amortiguamiento del suelo en el modo de rotación de la cimentación |
| C_h | amortiguamiento en traslación del suelo |
| C_r | amortiguamiento en rotación del suelo |
| $\tilde{\omega}_{e0}$ | frecuencia fundamental de la estructura efectiva |

2.4 Sismicidad México

La dinámica de la corteza terrestre es controlada a partir de las corrientes de convección produciendo los desplazamientos de las placas tectónicas (Servicio Geológico Mexicano, 2017). Una placa tectónica es un bloque rígido superficial (litosfera) de la Tierra. Estas placas cubren la superficie terrestre y se mueven en diferentes direcciones produciéndose choques entre ellas (Kostoglodov & Pacheco, 1999).

La República Mexicana es resultado de muchos procesos tectónicos; en este país coinciden cinco placas tectónicas: Placa de Norteamérica, Placa de Rivera, Placa de Cocos, Placa del Pacífico y la Placa del Caribe. La Placa de Norteamérica es la que ocupa una mayor porción continental y se extiende a toda Norteamérica, parte del océano Atlántico y parte de Asia. La placa del pacífico comprende a la península de Baja California, el oeste de California y al océano Pacífico (Figura 7). La placa del Caribe abarca el sur de Chiapas, las islas caribeñas y los países de Centroamérica. Las otras dos placas que inciden en la república son oceánicas, se encuentran en el océano Pacífico, y son la Placa de Rivera y la Placa de Cocos (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

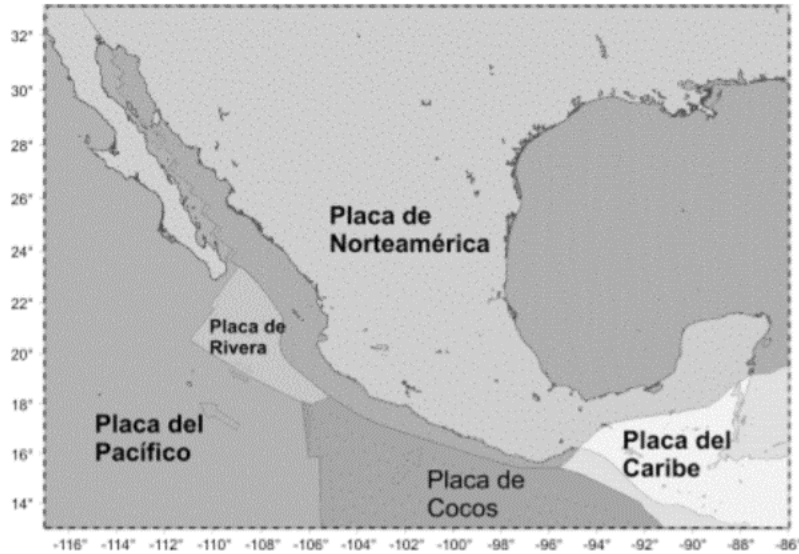


Fig. 7 Placas tectónicas que inciden en México (Corona & Benavides, 2012)

Hablando de los movimientos que tienen estas placas; la placa del Pacífico se mueve con respecto a la placa de Norteamérica al noroeste a lo largo de la conocida falla de San Andrés, la velocidad de este movimiento es de 3.5 cm por año. La placa de Rivera se aleja de la placa del Pacífico en dirección noreste a una velocidad de 6 cm por año. La placa de Cocos y Rivera tienen un movimiento en dirección noreste hundiéndose sobre la placa de Norteamérica (subducción). Al sur en la dorsal de Tehuantepec se encuentra un sistema de fallas que separan las placas de Norteamérica, la placa de Cocos y la placa del Caribe (Aguayo & Trápaga, 1996). En la figura 8 se puede ver la dirección de estos movimientos y los sismos que han ocurrido marcando la forma de las placas.

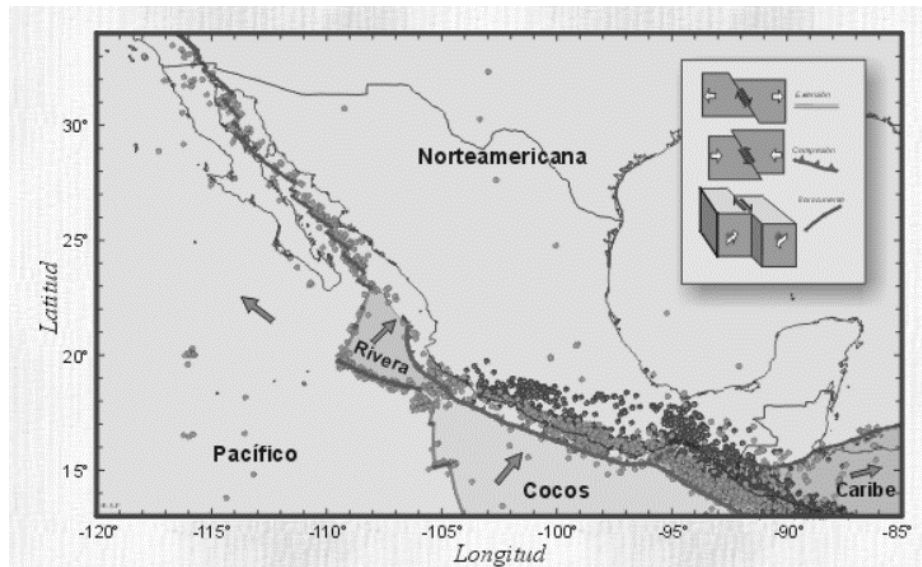


Fig. 8 Tipos de falla (Kostoglodov & Pacheco, 1999)

2.4.1 Sismos de subducción

Los sismos de subducción son producidos por el fracturamiento de dos placas donde una de ellas se mete por debajo de la otra; en este proceso se produce un valle profundo o trinchera (Servicio Geológico Mexicano, 2017). Estos sismos se encuentran en límites convergentes y esto ocurre cuando la densidad de las placas es diferente o se generan sistemas montañosos cuando la densidad es similar. Este tipo de sismos ocurren frecuentemente en zonas pobladas como Japón y algunas regiones de América central y Sudamérica, esto incluye a México. En México, los sismos de subducción se generan con el roce de la placa de Rivera y de Cocos que se meten a la placa Norteamericana. Estos sismos son someros con una profundidad entre 5 y 30 km. Los sismos más grandes de los que se tiene registro de este tipo en México son el sismo de 3-junio-1932 en la costa de Jalisco, el sismo del 7-septiembre-2017 en el golfo de Tehuantepec, con magnitud 8.2; otro sismo muy importante de este tipo fue el sismo del 19-septiembre-1985 en la costa del estado de Michoacán con magnitud 8.1, que causó grandes daños en la Ciudad de México por los efectos de sitio y las amplificaciones de aceleración que se produjeron (Kostoglodov & Pacheco, 1999). En la figura 9 se presenta la zona de subducción en la que se presenta el choque entre las placas tectónicas.

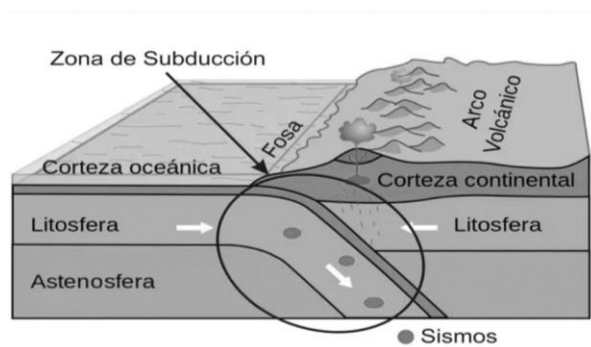


Fig. 9 Zona de subducción (Salguero, 2017)

2.4.2 Sismos intraplaca

Estos sismos generalmente son de menor magnitud que los interplaca (subducción) y ocurren fuera del límite de placas. Estos sismos ocurren dentro de las placas tectónicas a profundidades mayores de 40 km, se producen por el resquebrajamiento de las placas oceánicas de Rivera y Cocos en subducción (Kostoglodov & Pacheco, 1999). En estas placas se forman las llamadas zonas de Benioff que son las trazas de los sismos cuando se grafican en sección transversal. Bajo las placas de Rivera y de Cocos; se deforman al penetrar el manto terrestre presentando diversas formas en el país. Estas placas subducen con ángulos mayores a 45° y en algunos casos son horizontales (Kostoglodov & Pacheco, 1999). El sismo más devastador para este tipo de sismos en México y de este siglo corresponde al del 19-septiembre-2017 que ocurrió dentro de la placa de Cocos por debajo del continente a una profundidad de 57 km, ubicado entre los límites del estado de Puebla y Morelos al sureste de Axochiapan. En la figura 10 se muestra un corte con la ubicación de este sismo y la zona donde se presentan los sismos intraplaca.

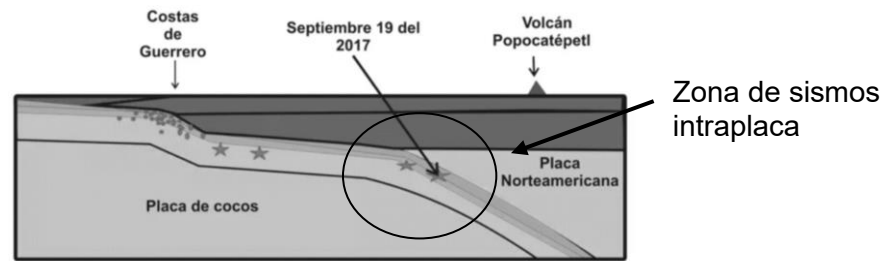


Fig. 10 Zona de sismos intraplaca (Salguero, 2017)

2.4.3 Sismos corticales

Los sismos corticales son sismos intraplaca superficiales, ocurren principalmente a lo largo del Eje Volcánico mexicano. Algunos ejemplos de estos sismos son el sismo del 19-noviembre-1912 en Acambay con una magnitud de 6.9, el sismo de 3-enero-1902 en Xalapa y el sismo del 3-mayo-1887 en Bavispe. Como no se tienen acelerogramas de estos sismos destructivos, pero sí evidencia geológica la forma de estudiar estos sismos se realiza con la neotectónica. Las fallas que podrían afectar a la zona centro del país son el Graben de Acambay, sistema de fallas Tenango y el sistema de fallas faja volcánica transmexicana.

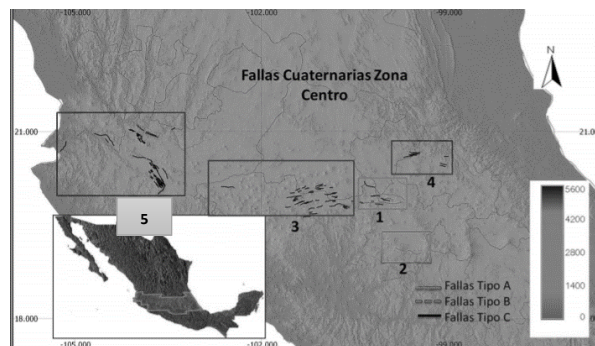


Fig. 11 Fallas cuaternarias zona centro (Cid Villegas, 2015)

En la figura 11, el recuadro uno muestra el graben de Acambay, el recuadro dos el sistema de fallas Tenango, el recuadro tres las fallas Chapala Tula, el recuadro cuatro Ajibes-Mezquital y el cinco Tepic Zocoalco. Las fallas tipo A son fallas que presentan desplazamientos en el Holoceno, las fallas tipo B son fallas con desplazamientos en el Pleistoceno que posiblemente presentaron desplazamientos en el Holoceno y las fallas tipo C son fallas con desplazamientos en el Pleistoceno (Cid Villegas, 2015).

Estos sismos aun con una magnitud menor que los demás provocan grandes daños por tener hipocentros cercanos a la superficie que pueden llegar a ser menores de 15 km.

III. PROTOTIPO DE PUENTES Y SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS

3.1 Descripción del prototipo de puente

Para este estudio se partió de un puente urbano típico de la Ciudad de México (figura 12) ubicado en zona de lago con las siguientes características.

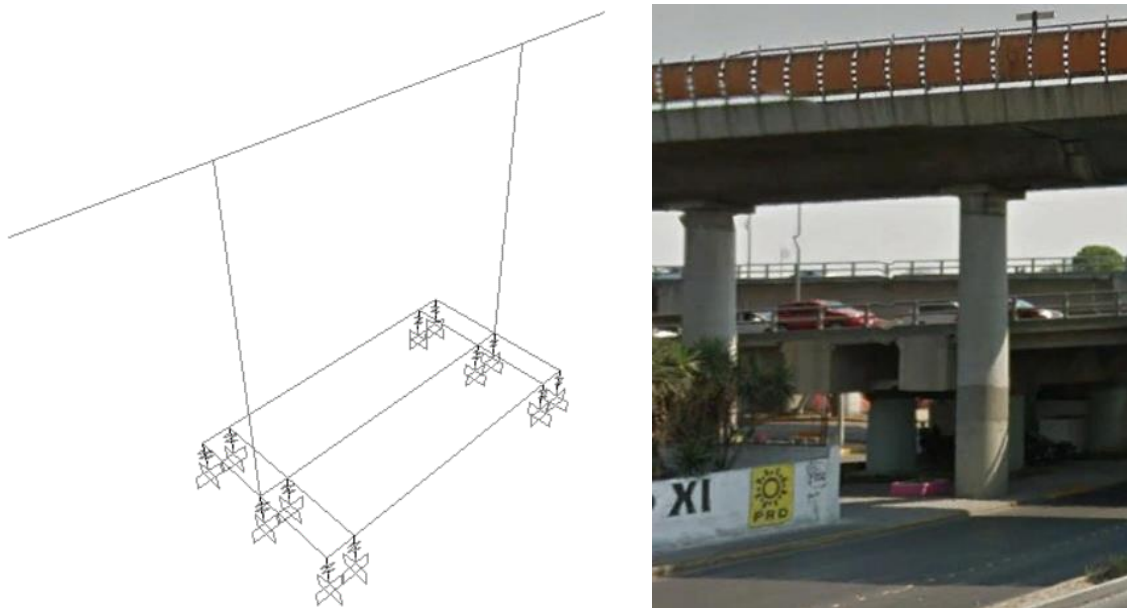


Fig. 12 Esquema en elevación del esquema de puente

Geometría

- Trabe de doble vía, de 20 m de longitud conectada a dos columnas a 4.5 m de distancia a partir de los extremos. La trabe es de sección cajón de concreto $f'c=300$ kg/cm². Las propiedades geométricas son: $A=1,973$ cm², $I_x= 55,081,335$ cm², $I_y= 643,600,000$ cm². La sección cajón se muestra en la figura 13.

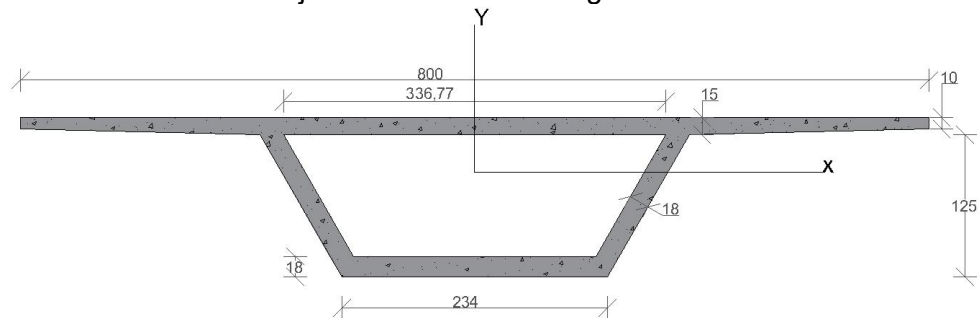


Fig. 13 Sección cajón ocupada acotada en cm

- Tiene dos columnas de sección circular de concreto reforzado, $f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$, con un diámetro de 140 cm y 11 m de altura. El acero de refuerzo está formado por 44 barras del número 10, dos zunchos circulares del número cuatro con recubrimiento de seis cm (figura 14).

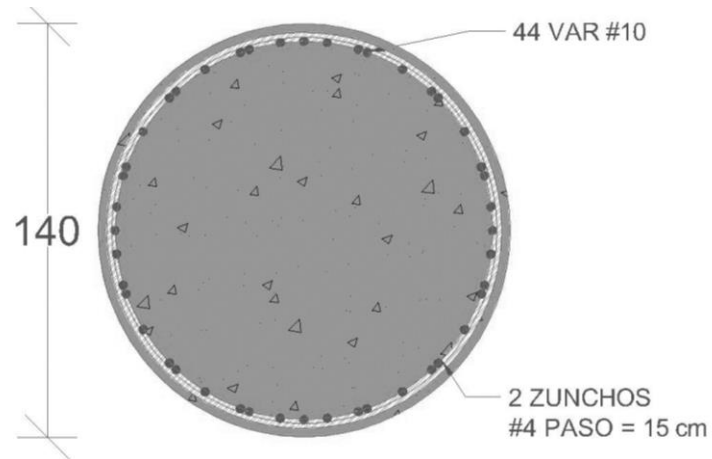


Fig. 14 Sección de la columna del puente, acotada en cm

- Se ocupó una cimentación mixta de cajón con 26 pilotes cuadrados de 40 cm con una longitud de 40 m, trabajando por fricción. El cajón está desplantado a 2.7 m (Figura 15).

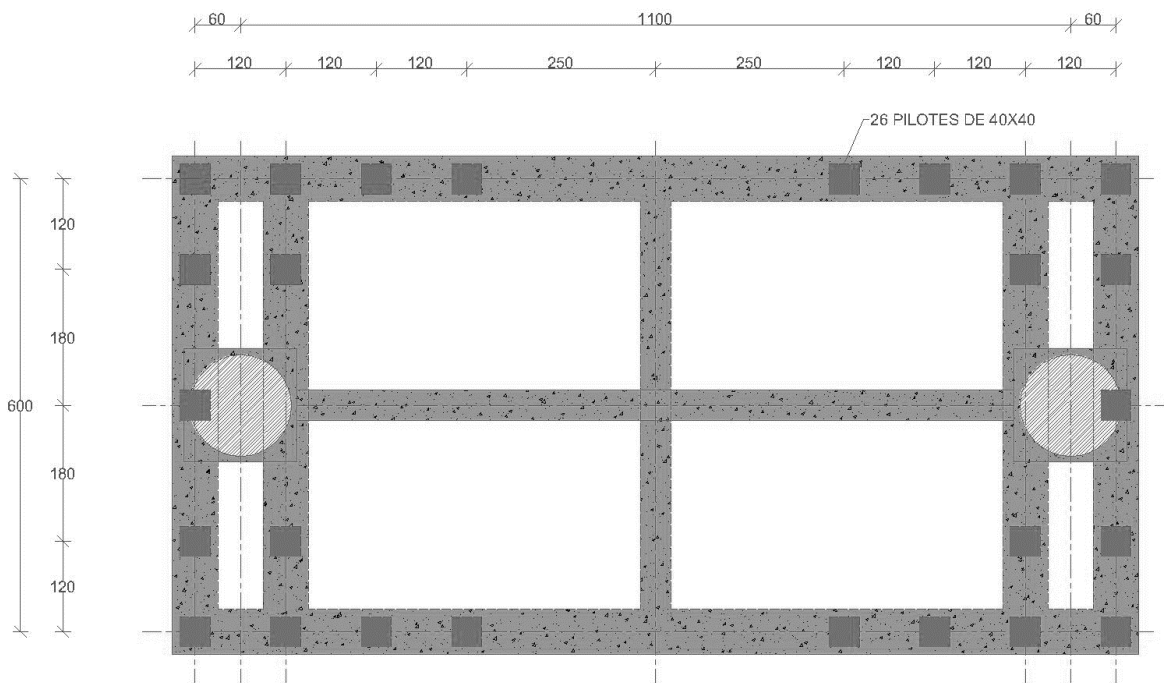


Fig. 15 Cimentación mixta del puente acotada en cm

Cargas del puente

Para el cálculo del periodo de vibrar del puente y del nivel de carga axial que obra sobre las columnas, es indispensable realizar una bajada de cargas; Para ello se consideró el peso de la estructura (trabe de sección cajón y columna circular) y cargas vivas. Las cargas vivas se calcularon tomando en cuenta el peso de dos vagones del Sistema de Transporte Colectivo (metro) tomado de la página Metro CDMX (Sistema de Transporte Colectivo, 2008), se tomó en cuenta el número de personas que caben por vagón que en promedio es de 170 personas pero puede cambiar según el tipo de vagón como se puede ver en la tabla 4, se consideró el peso promedio por persona de 75 kg. En la tabla 8 se resume el cálculo de estos pesos.

Tabla 4 Pesos de vagones y número de personas de vagones del metro

| Datos | Rodadura neumática | | | Rodadura férrea | | |
|-----------------------------|--------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| | M | N | R | M | N | R |
| Peso vagón (kg) | 28,930 | 27,830 | 20,837 | 26,564 | 24,680 | 21,116 |
| Número de personas | 170 | 170 | 170 | 156 | 160 | 160 |
| Peso de las personas (kg) | 12750 | 12750 | 12750 | 11700 | 12000 | 12000 |
| Peso total (kg) | 41680 | 40580 | 33587 | 38264 | 36680 | 33116 |
| Longitud (m) | 17.10 | 16.20 | 16.20 | 16.90 | 15.78 | 15.78 |
| Peso lineal(kg/m) | 2437 | 2505 | 2073 | 2265 | 2324 | 2099 |
| Peso lineal 2 vagones(kg/m) | 4875 | 5010 | 4147 | 4530 | 4649 | 4197 |

Notas: M, carro motriz con cabina de conducción; N, carro motriz sin cabina; R, carro remolque.

Estratigrafía considerada

La zona lacustre del Valle de México está formada por depósitos que se conocen como de lago y esto se debe a las condiciones climáticas en ciertos tiempos geológicos, que propiciaron la existencia de un lago en el Valle de México. Los suelos arcillosos blandos son la consecuencia del proceso de depósitos y de alteraciones fisicoquímicas de los materiales aluviales y de las cenizas volcánicas (COVITUR, 1987).

Un perfil típico de la zona de lago tiene la siguiente estratigrafía: costra superficial, serie arcillosa lacustre superior, capa dura, serie arcillosa lacustre inferior y depósitos profundos.

Para el caso de este estudio se ocupó la estratigrafía de una zona de lago con 53 m de espesor de arcilla y se despreció el espesor de la costra superficial por ser de unos pocos metros y ser prácticamente la misma profundidad que el nivel de desplante. Las propiedades mecánicas y dinámicas del suelo que se ocuparon fueron: peso volumétrico ponderado del suelo de 1.25 t/m^3 , velocidad de onda de cortante 53 m/s y el módulo de rigidez a cortante de 357 t/m^2 . Se considero que en la superficie este lugar tiene un periodo fundamental del suelo de 4 s. Este perfil se muestra en la figura 16. Una forma de obtener las propiedades dinámicas de un suelo es a través de correlaciones como la de Romo y Ovando (1995), donde se puede ocupar la resistencia de penetración de un cono eléctrico hincado con una velocidad constante de 2 m/s, en este caso no se ocuparon por no tener los parámetros suficientes.

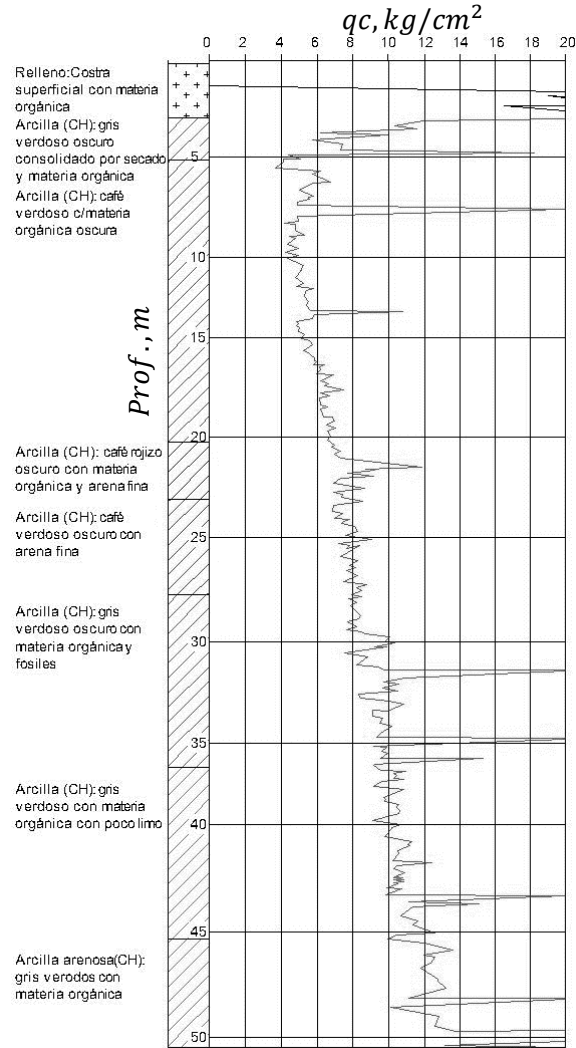


Fig. 16 Perfil estratigráfico y sondeo de cono eléctrico en kg/cm^2 y profundidad en m

Propiedades dinámicas del suelo

Se ocuparon las propiedades dinámicas de una arcilla típica, con los valores que se describen a continuación.

Relación de Poisson. Se tomó 0.49 por ser un suelo plástico, ya que por la alta velocidad con que se aplican las fuerzas el suelo responde bajo una condición no-drenada, lo cual es semejante a un suelo incompresible ($\nu_s = 0.5$) (Botero, 2000).

Porcentaje de amortiguamiento crítico del suelo. El amortiguamiento proporciona una medida de la energía disipada. Investigaciones desarrolladas por Seed e Idris (1970) y Kokusho, Yoshida y Esash (1982), investigaron que para suelos cohesivos este amortiguamiento oscila entre 5% y 8% para deformaciones prácticas, es decir las que se presentan durante un sismo, como cita Fernandez (2014).

Las arcillas de la Ciudad de México disipan poca energía y para el rango de deformaciones que provoca un sismo se pueden considerar valores menores a 5 % en el análisis de interacción-suelo estructura, tal como se aprecia en las figuras 17 y 18.

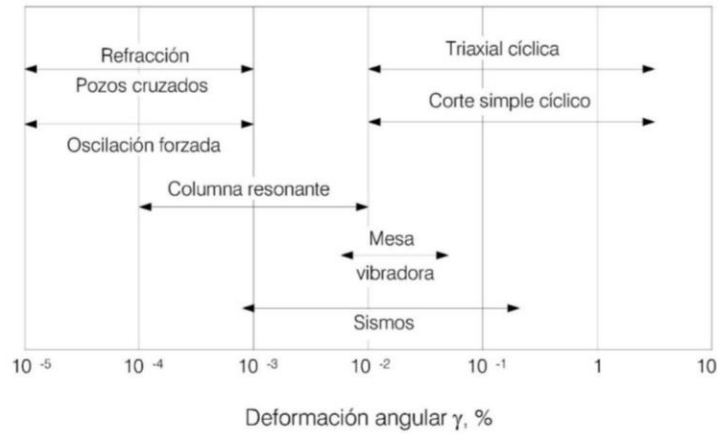


Fig. 17 Rango de deformaciones inducidas al suelo (Solis, 2017)

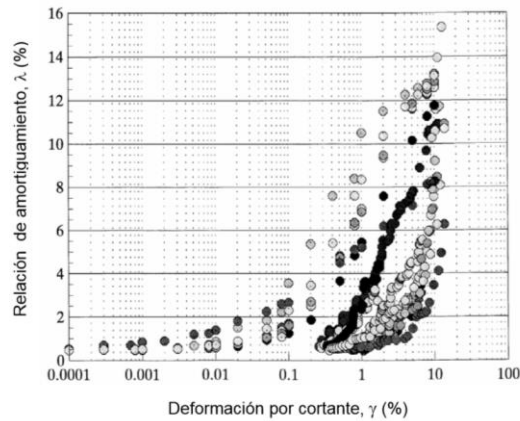


Fig. 18 Amortiguamiento para arcillas de la ciudad de México (Flores, 2007)

Módulo de cortante dinámico (G). Esta propiedad tiene un comportamiento no lineal y se puede obtener con pruebas geofísicas a bajas deformaciones y a deformaciones angulares grandes con pruebas como torsión cíclica o prueba triaxial cíclica. Con la teoría de la elasticidad se puede obtener con la expresión siguiente:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu_s)} \quad (37)$$

donde,

E módulo de elasticidad del suelo
 ν_s relación de poisson

Esta propiedad alcanza su valor máximo a bajas deformaciones por lo que se puede calcular su valor con la velocidad de onda de cortante y la densidad del suelo.

$$G_{max} = \rho \beta_s^2 \quad (38)$$

donde,

ρ densidad del suelo
 β_s velocidad de onda de cortante

En el perfil estratigráfico que se presentó hay arcillas de muy blandas a medias por lo que el módulo de cortante dinámico entra dentro de los valores típicos de esta propiedad como se presenta en la tabla 10.

Tabla 5 Valores típicos del módulo de cortante de diversos suelos (Fernandez, 2014)

| Tipo de suelo | G_{max} t/m ² |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Arcilla muy blanda | 200-300 |
| Arcillas de blandas a medias | 300-1400 |
| Arcilla limosa blanda a media | 900-1400 |
| Arena densa limpia | 1200-2000 |
| Arcilla media a firme | 1400-2800 |
| Arcilla limosa media, seca | 1700-2100 |
| Mezcla grava-arena densa | 5000-7000 |

Razón de amortiguamiento crítico de la estructura

Esta propiedad representa la energía cinética que disipa un sistema estructural y depende de varios factores como el tipo de material y el daño esperado. Normalmente la energía que pierde un sistema se debe a la fricción interna, conexiones o componentes no estructurales (Finley, 2008). La forma más fácil matemáticamente de representar estas pérdidas de energía es con un amortiguamiento viscoso directamente proporcional a la velocidad. El amortiguamiento clásico o de Rayleigh es una combinación lineal de la matriz de rigidez y de la matriz de masas y es el comúnmente ocupado. Por lo general en una estructura empotrada en el primer modo este valor varía entre 0.02 y 0.1 pero el valor generalmente ocupado es de 0.05.

Rigidez y amortiguamiento del sistema suelo-estructura

Para el cálculo de los resortes para la ISE se ocupó la metodología de la CFE (CFE, 2015), comparando esta contra la de las NTC-2017 de sismo, son prácticamente iguales, pero cambia ligeramente la forma de calcular el amortiguamiento efectivo del sistema suelo-estructura, se consideró más adecuada la ecuación de la CFE que es la ecuación 34. Para conocer mejor los efectos de la ISE cuando se tiene un grupo de pilotes se realizó un estudio paramétrico con dos factores que intervienen en la respuesta dinámica de la estructura. Estos parámetros dimensionales se describen ampliamente en el trabajo de Botero, Jaramillo y Rochel (2004), los cuales se comentan brevemente a continuación.

Relación de esbeltez. Es la relación entre la altura de la estructura H_e , y el radio de la cimentación equivalente, R . Como indica el trabajo anterior esta relación es muy importante en la respuesta suelo-estructura.

$$R_E = \frac{H_e}{R} \quad (39)$$

Para conocer los efectos de esta relación en una cimentación con pilotes se ocupó la cimentación descrita anteriormente y se varió la relación de esbeltez en un rango de [0,5], cambiando la altura de la estructura en cada iteración.

$$H_e = R_E R \quad (40)$$

En el primer caso se ocupó como una cimentación superficial y en el segundo caso se ocupó la cimentación mencionada con pilotes. Se puede observar en la figura 19 que cuando esta relación es menor a 1.5 la razón de amortiguamiento crítico es grande y las cimentaciones superficiales tienen un amortiguamiento mayor que las cimentaciones con pilotes, cuando la relación es mayor a 1.5 aproximadamente, las cimentaciones con pilotes tienen mayor amortiguamiento. En los dos casos se observa que el amortiguamiento disminuye con el aumento de esta relación.

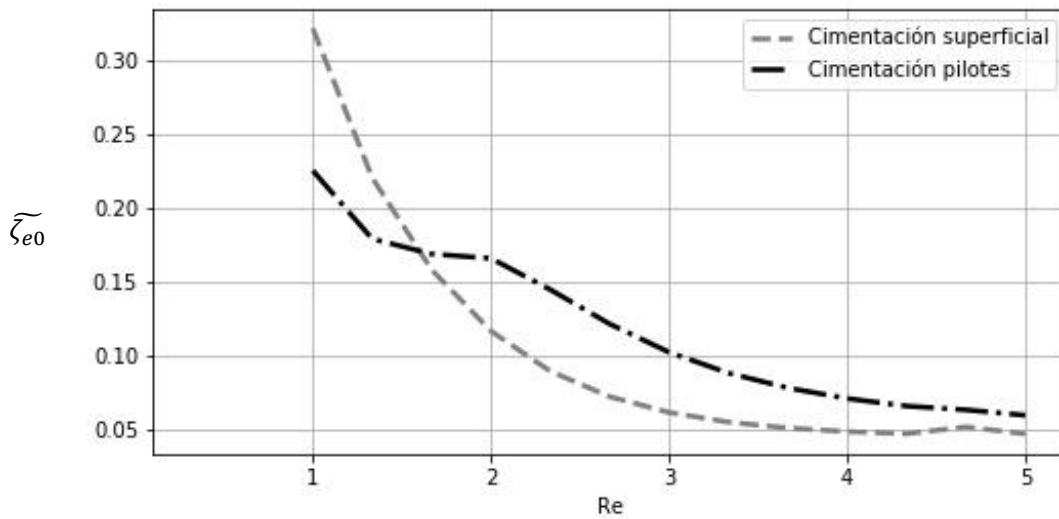


Fig. 19 Variación de amortiguamiento crítico $\tilde{\zeta}_{e0}$ con la relación de esbeltez en cimentación con pilotes y superficial

En la figura 20 se puede observar que el cociente entre el periodo efectivo y el periodo de la estructura ($\frac{\tilde{T}_e}{T_e}$) es mayor con relaciones de esbeltez menores y con relaciones de esbeltez mayores los periodos tienden a ser iguales. Comparando las cimentaciones superficiales contra las cimentaciones con pilotes se puede observar que la relación de periodos siempre es mayor en cimentaciones superficiales esto indica que las cimentaciones superficiales son más flexibles que las cimentaciones con pilotes.

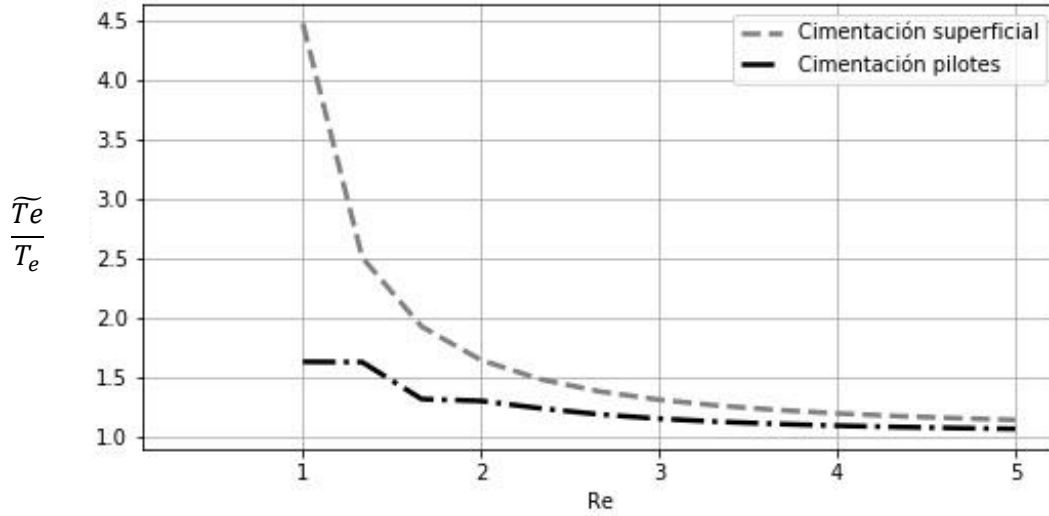


Fig. 20 Variación de periodo efectivo con la relación de esbeltez en cimentación con pilotes y superficial

Rigidez relativa. Es la relación entre la rigidez relativa de la estructura y el suelo.

$$R_R = \frac{H_e T_s}{H_s T_e} \quad (41)$$

Se hizo un análisis paramétrico similar, pero ocupando la rigidez relativa en un rango de $[0,2]$, cambiando en cada iteración el periodo del suelo.

$$T_s = \frac{R_R H_s T_{e_s}}{H_e} \quad (42)$$

En la figura 21 se presentan los resultados. Primero se ve que las cimentaciones con pilotes tienen mayor amortiguamiento que las cimentaciones superficiales, también se puede observar porque en las NTC-sismo (2017) se establece la expresión 1, descrita brevemente en el capítulo 2.3 de este trabajo, para saber cuándo tomar en cuenta los efectos de interacción suelo-estructuras, esa expresión es claramente el inverso de la relación de rigidez y como se ve en la gráfica para valores menores de 0.4 (1/2.5) los efectos de amplificación de la razón de amortiguamiento efectivo son nulos. Por último, se puede observar que en cimentaciones superficiales la razón de amortiguamiento puede ser menor a 5 por ciento, indicando que la respuesta tomando en cuenta la interacción suelo-estructura puede ser mayor.

En la figura 22 se observa algo muy similar a la figura 21, en donde, se observa que las cimentaciones superficiales son más flexibles que las cimentaciones con pilotes y también se puede apreciar que los efectos antes de 0.4 son casi despreciables y representan aumentos en el periodo menores al 5 por ciento.

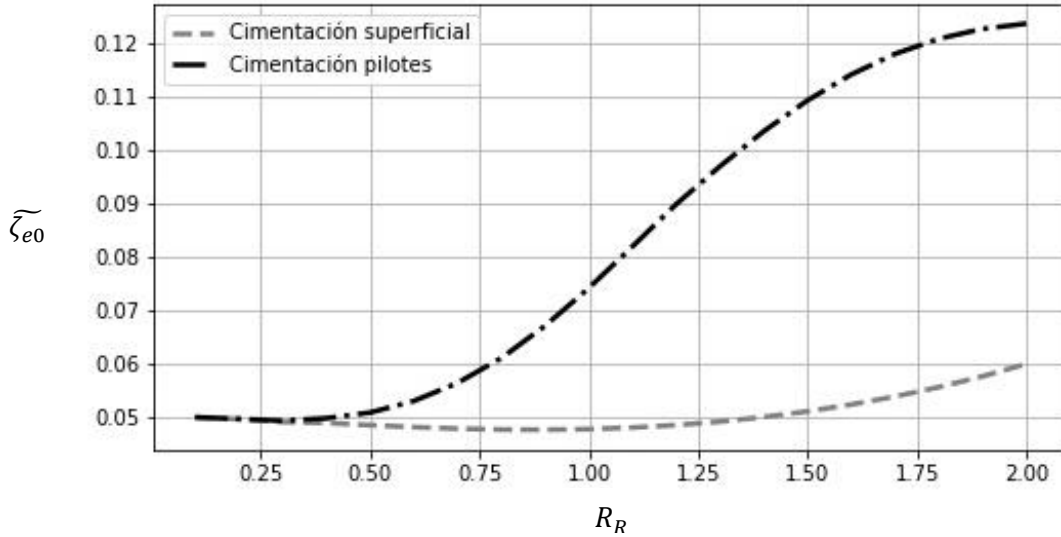


Fig. 21 Variación de amortiguamiento crítico efectivo ζ_{e0} con la relación de rigidez en cimentación con pilotes y superficial

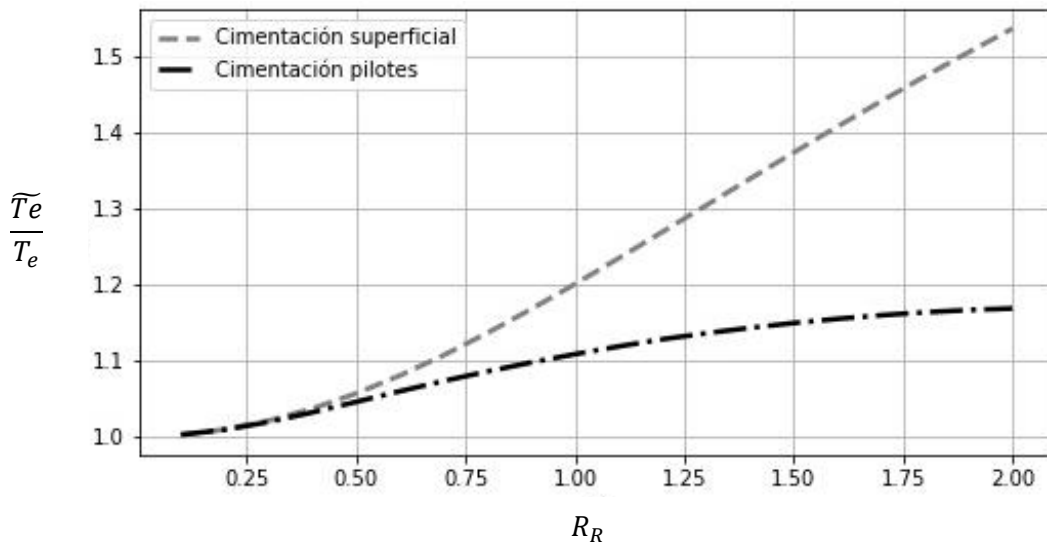


Fig. 22 Variación de periodo efectivo con la relación de rigidez en cimentación con pilotes y superficial

3.2 Selección de acelerogramas

Los criterios que se ocuparon para seleccionar los acelerogramas para este estudio fueron: ubicación de estaciones; tipo de suelo de las estaciones sísmológicas; magnitud de los sismos; fuentes sísmicas; tasas de excedencia representativas de estados límites de diseño para servicio y supervivencia.

Tipo de suelo. Se seleccionaron estaciones que tuvieran un suelo blando para considerar los efectos de interacción suelo-estructura, se contemplaron suelos arcillosos, arcilla compacta y una estación en suelo aluvial.

Fuentes sísmicas. Dado que el objetivo de la investigación es analizar el efecto de distintas fuentes sísmicas en un puente, tomando en cuenta la interacción suelo estructura, se seleccionaron sismos cuyas fuentes fueron de subducción, intraplaca y corticales. Para la identificación del tipo de sismo se ocupó la ubicación del epicentro y su profundidad. En la figura 23 se muestra el epicentro de los registros que se obtuvieron y su fecha por tipo de sismo.

Ubicación. Para sismos de fuentes intraplaca y subducción se eligieron estaciones ubicadas en la zona de lago de la Ciudad de México. En el caso de los sismos corticales se utilizaron registros de otros sitios ya que no se encontraron registros de sismos en la Ciudad de México con aceleraciones significativas.

Magnitud de los sismos. Se consideró que la magnitud mínima de los sismos fuera mayor a 6.4 en el caso de los sismos de subducción, mayores a 5.6 en los sismos de intraplaca y mayores a 3.5 en los sismos corticales; en este último, debido a que no existe suficiente información de registros con magnitudes mayores.

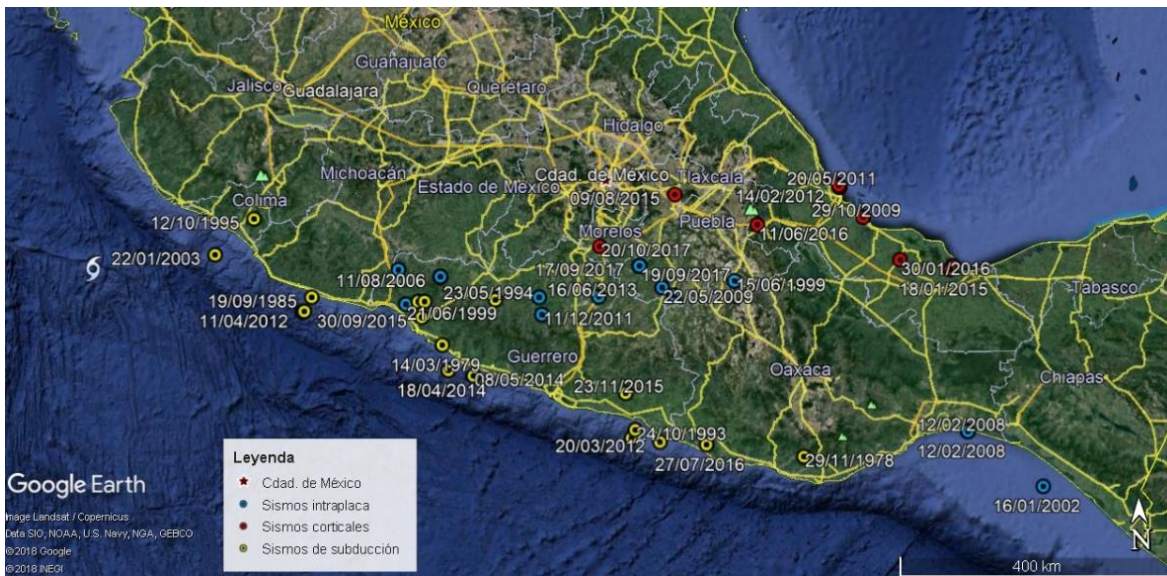


Fig. 23 Sismos considerados para el proceso de selección de los acelerogramas para este estudio

En la tabla 6 se resumen los criterios empleados para la selección de los registros. En dicha tabla se describen las fuentes sísmicas consideradas y para cada una de estas el tipo de suelo, ubicación de la estación y la magnitud.

Tabla 6 Criterios ocupados para obtención de registros

| Fuente sísmica | Tipo de suelo | Ubicación de la estación | Magnitud sísmica |
|----------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Subducción | Suelo de consistencia blanda | Zona de lago de la Ciudad de México | M>6.3 |
| Intraplaca | | | M<5.6 |
| Corticales | | Suelo lacustre | M<3.5 |

En tanto las figuras 24 y 25 muestran la ubicación de las estaciones en las zonas de lago y transición de la Ciudad de México, en las cuales se tienen registros de sismos de subducción e intraplaca, respectivamente. Mientras que en la figura 26 se muestran las

estaciones ubicadas en suelos de consistencia blanda en el centro de la República Mexicana, en donde, se tienen registros que emanan de la fuentes sísmicas corticales.

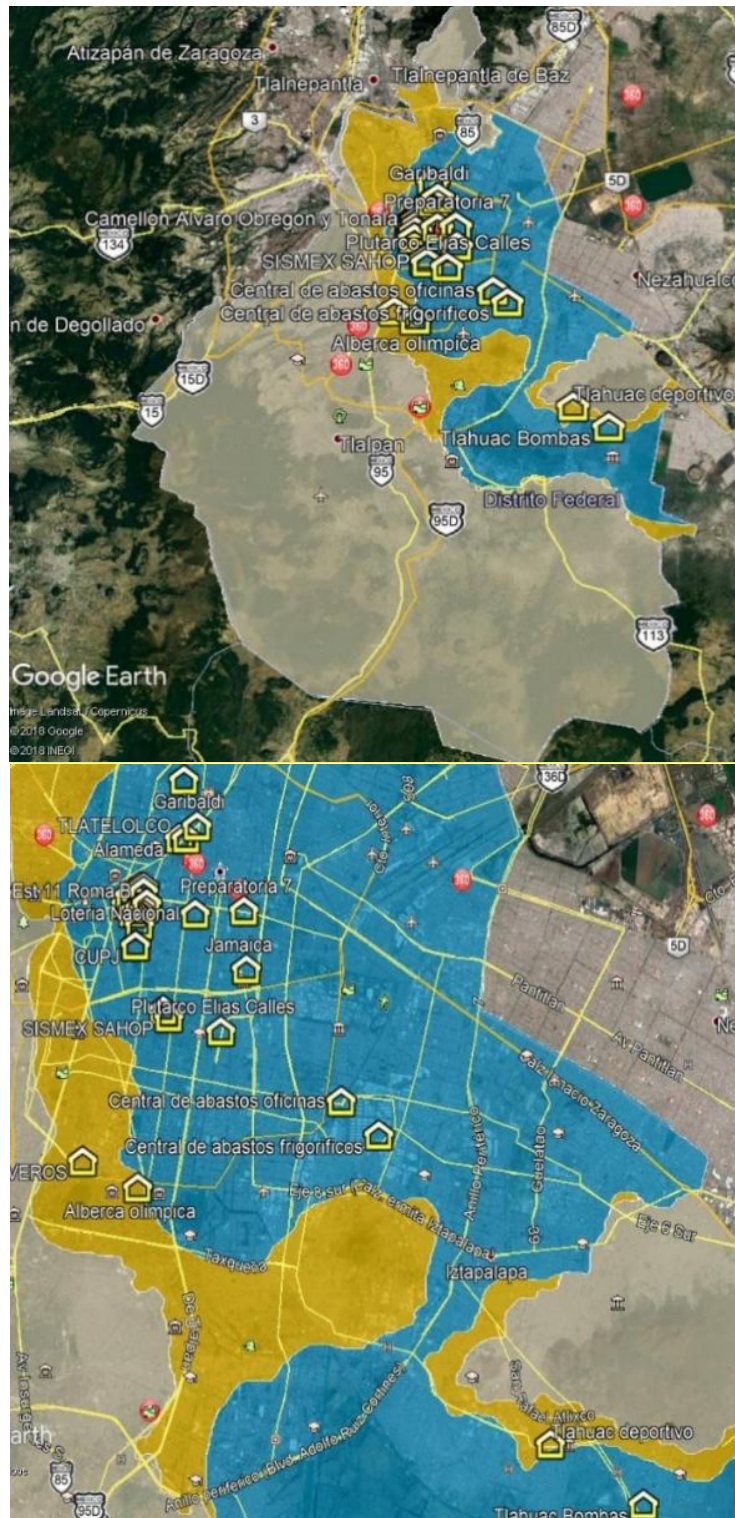


Fig. 24 Estaciones que registraron sismos de subducción en la zona de lago

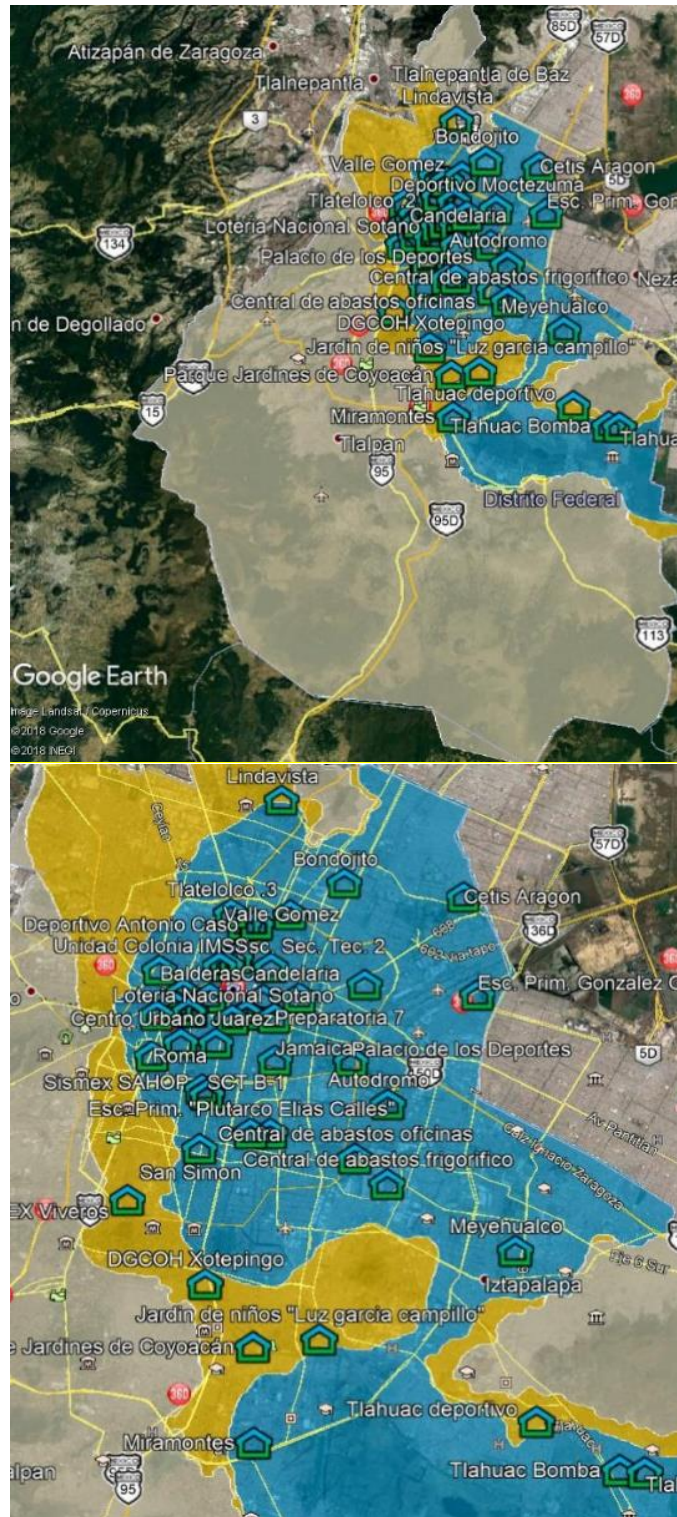


Fig. 25 Estaciones que registraron sismos intraplaca en la zona de lago o transición alta



Fig. 26 Estaciones que registraron sismos corticales en suelos blandos

Con esta información se seleccionaron 17 registros de sismos corticales, 60 registros de sismos intraplaca y 65 registros de sismos de subducción.

Tratamiento de registros. Los acelerogramas obtenidos se trataron con los métodos indicados por Rascón *et al.* (1976) y Ordaz *et al.* (2002), ocupando la siguiente metodología:

El primer tratamiento de las señales que se hizo fue corregir la línea base restando una constante a todo el registro, esta constante es el promedio de los valores y la corrección es tal que el promedio de los valores es cero.

El segundo tratamiento fue filtrar las señales con Pasa-banda en el dominio de las frecuencias ocupando $F_{min} = 0.1$, $F_{max} = 10$, $N = 4$, taper 5%

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f^2 - F_{min}F_{max}}{f(F_{max} - F_{min})}\right)^{2N}}} \quad (43)$$

El tercer tratamiento que se le dio a las señales fue cortar los acelerogramas en función de la intensidad de Arias aplicando el criterio de cortarla del 5% al 95% en los tres canales del registro, para verificar que no se estuvieran cometiendo errores significativos en este paso se comparó el espectro de pseudoaceleración con el acelerograma antes de cortar contra el espectro de la señal recortada. En la figura 27 se muestra un ejemplo del recorte de la señal ocupando la gráfica de intensidad de Arias y como los espectros de pseudoaceleración siguen siendo prácticamente los mismos. Este paso es muy importante ya que se reduce sustancialmente el tiempo computacional de los análisis no lineales.

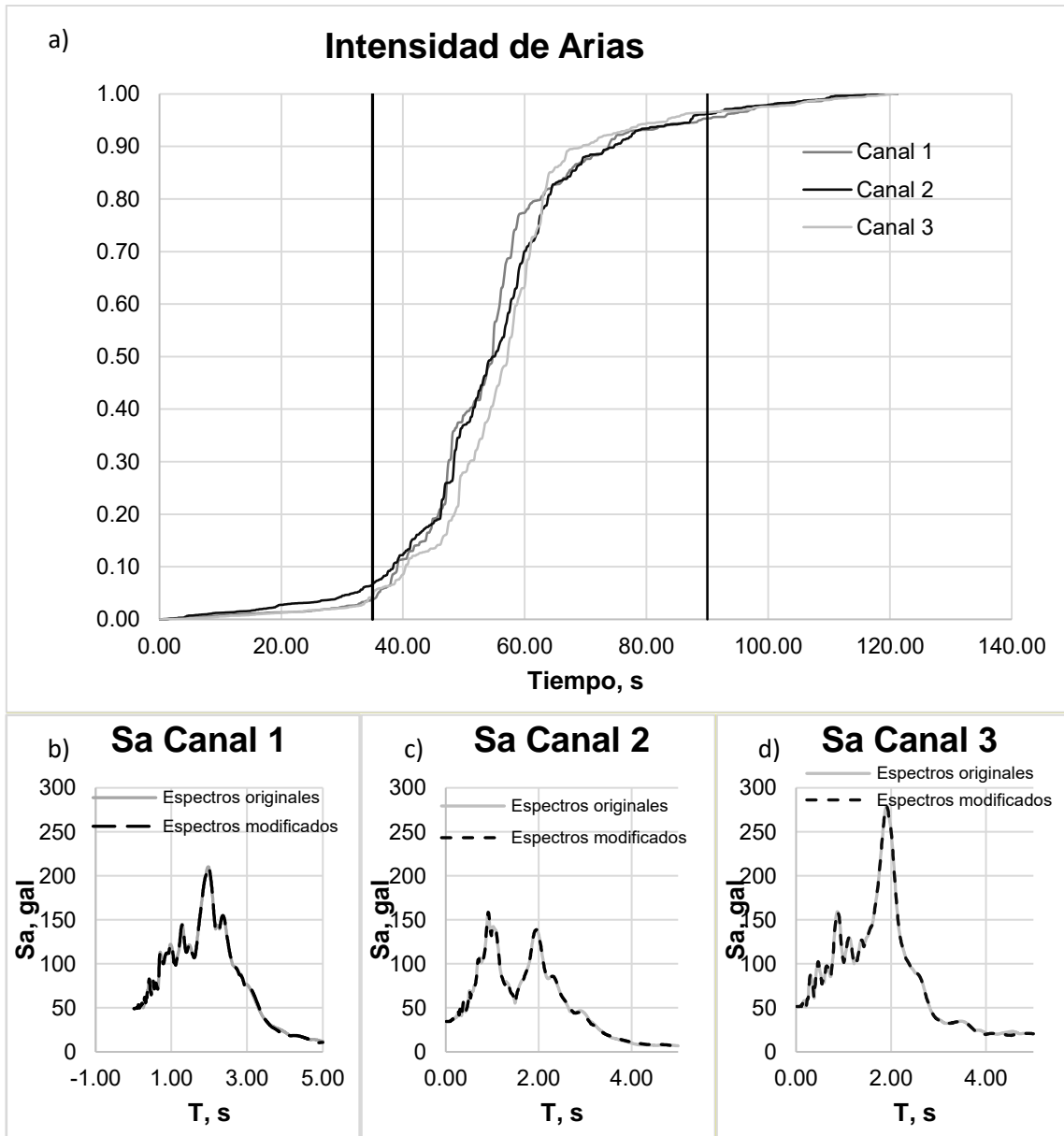


Fig. 27 a) Gráfica de intensidad de Árias del registro TLHD8509 de los tres canales y b,c,d) los espectros de pseudoaceleración antes de cortar y después de cortar la señal

Clasificación de acelerogramas. Se identificó la respuesta pico de la región espectral con los registros, tal como se muestra en la figura 28. Así mismo se obtuvieron espectros de Fourier en las direcciones horizontal y vertical para aplicar el cociente de Nakamura (2000) y con ello identificar el periodo dominante del suelo. El criterio que se siguió para determinar el periodo dominante del suelo fue elegir los máximos apreciables en las dos direcciones ortogonales del cociente de Nakamura. En la figura 28 se ilustra un ejemplo al respecto. En las tablas 7, 8 y 9 se ilustra la información obtenida por cada registro. En el anexo 1 se muestra el resto de la información por cada fuente sísmica.

Tabla 7 Registros de acelerogramas de sismos corticales

| Nombre de estación | Fecha | Ts s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
|-----------------------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| MINATITLAN ESCUELA HIJAS DE LERDO | 29/10/2009 | 4.8 | M=5.5 | -3.3 | 3.3 | 1.5 | 173 | Blando | 21 | 13 |
| MINATITLAN ESCUELA HIJAS DE LERDO | 18/01/2015 | 0.6 | M=4 | -3.8 | -3.0 | 6.5 | 29 | Blando | 21 | 24 |
| MINATITLAN ESCUELA HIJAS DE LERDO | 18/03/2015 | 3 | M=4.4 | -3.7 | -3.6 | 5.0 | 30 | Blando | 21 | 13 |

Nota: Ts, periodo fundamental del suelo

Tabla 8 Registros de acelerogramas de sismos de intraplaca

| Nombre de estación | Fecha | Ts s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
|------------------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| ESC. PRIM. "GONZÁLEZ GARZÓN" | 19/09/2017 | 5 | Mc=7.1 | 96.0 | 114.0 | 42.2 | 120 | Arcillas | 2232 | 57 |
| ALAMEDA | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 117.1 | 108.6 | 40.2 | 124 | Arcillas | 2232 | 57 |
| AUTÓDROMO | 19/09/2017 | 5 | Mc=7.1 | 72.1 | 90.4 | 35.2 | 118 | Arcillas | 2234 | 57 |

Nota: Ts, periodo fundamental del suelo

Tabla 9 Registros de acelerogramas de sismos de subducción

| Nombre de estación | Fecha | Ts s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
|------------------------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| ALAMEDA | 14/09/1995 | 2 | ME=7.3 | 41.0 | 35.2 | 10.2 | 349 | Arcillas | 2232 | 22 |
| CAMELLON ALVARO OBREGON Y FRONTERA | 22/01/2003 | 5 | Me=7.6 | 19.6 | 27.3 | -6.3 | 570 | Arcillas preconsolidadas | 2240 | 9 |
| CAMELLON ALVARO OBREGON Y ORIZABA | 22/01/2003 | 2 | Me=7.6 | 20.1 | -26.8 | -5.5 | 570 | Arcillas preconsolidadas | 2240 | 9 |

Nota: Ts, periodo fundamental del suelo

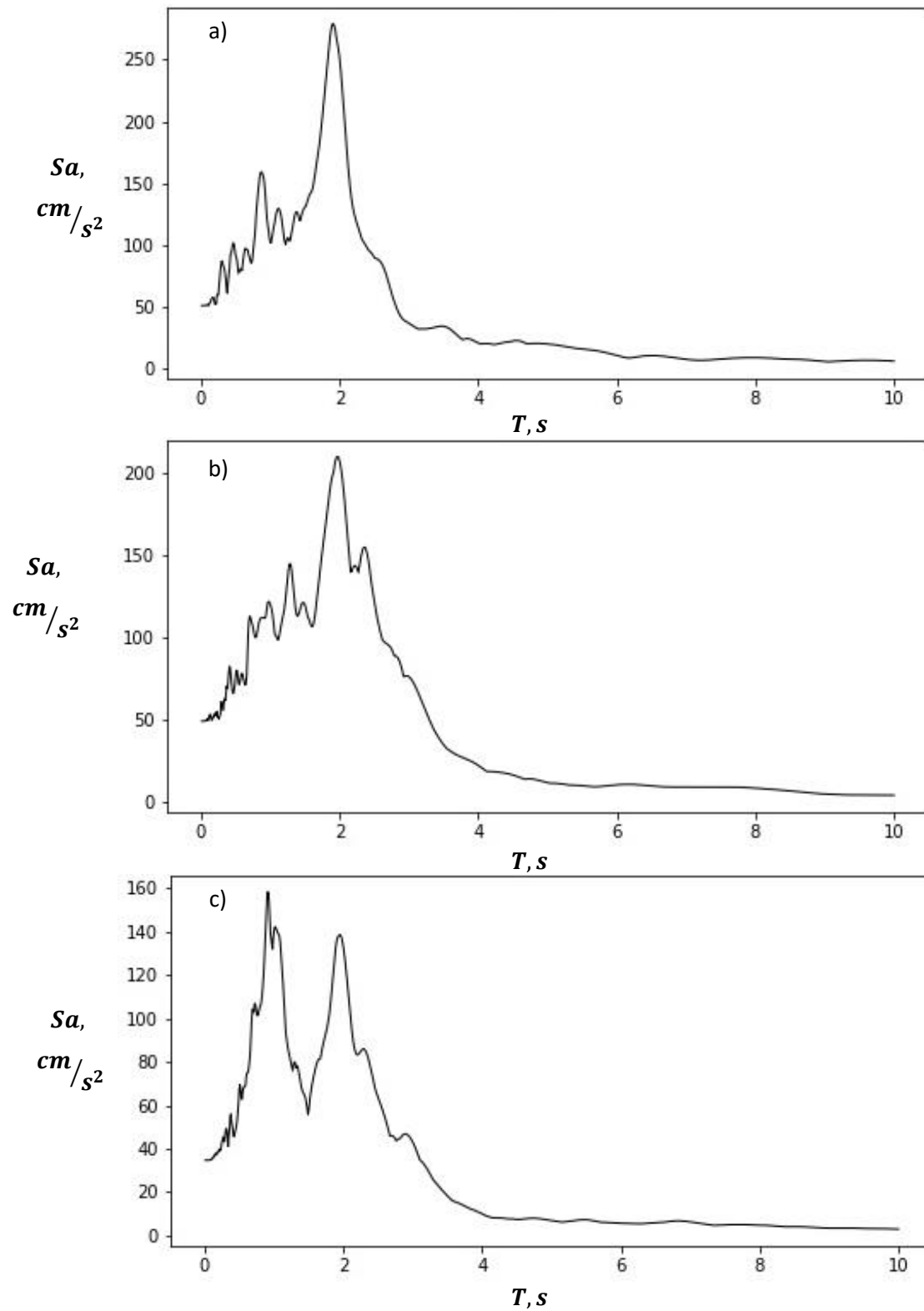


Fig. 28 Espectros de pseudoaceleración para el sismo 21/09/1985 registrado en la estación Tlahuac deportivo dirección a) E-W, b) N-S y c) vertical

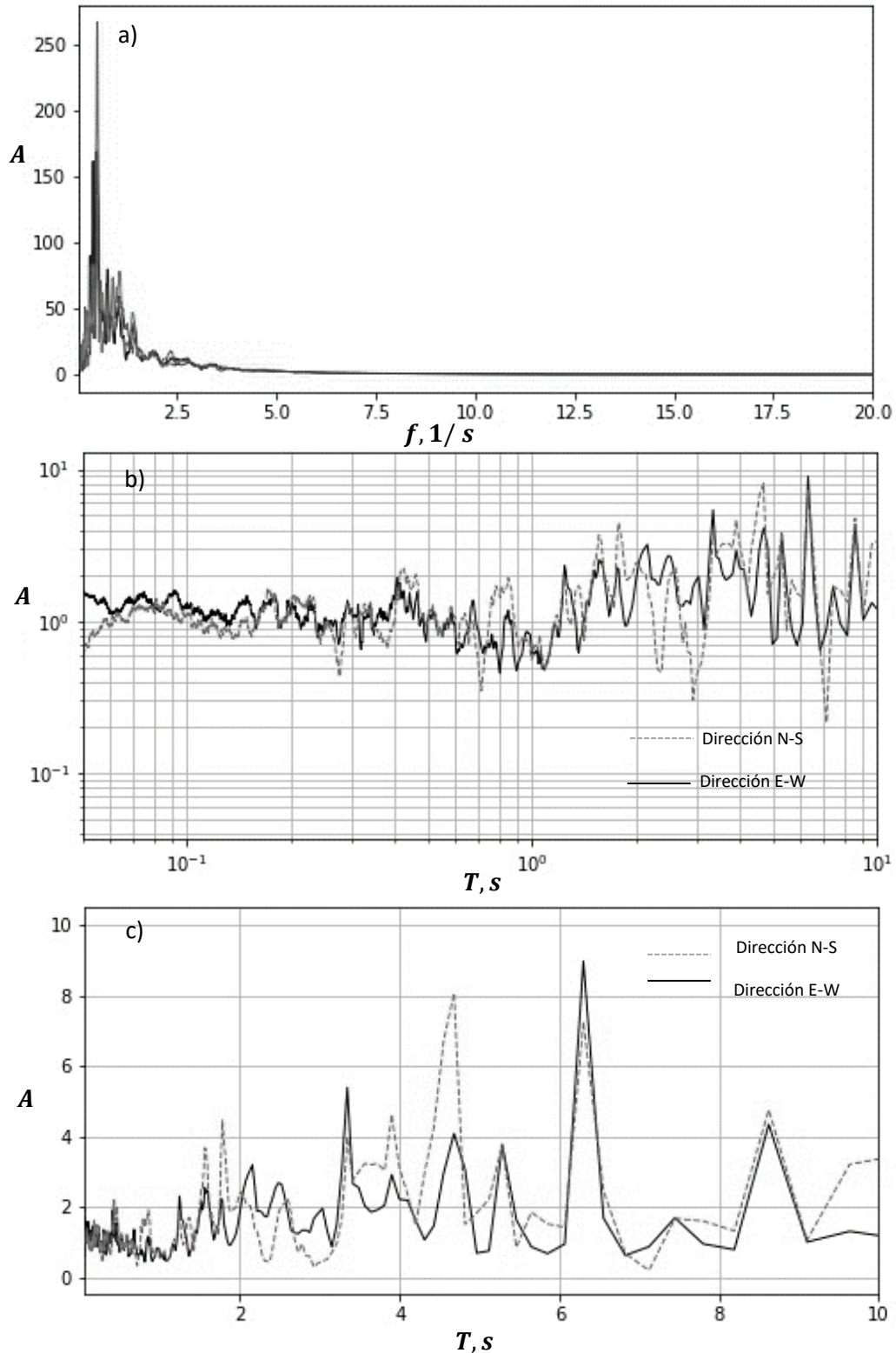


Fig. 29 a) Espectro de Fourierer y cocientes de NAKAMURA en escala b) logarítmica y c) escala normal para el sismo 21/09/1985 registrado en la estación Tlahuac deportivo dirección

En las figuras 30,31 y 32 se muestran las aceleraciones máximas de terreno de los registros sísmicos explorados para las tres fuentes, en las tres direcciones ortogonales (N-S, E-W, y V) y para el intervalo de magnitudes sísmicas consideradas, estas intensidades se ven afectadas también por la distancia epicentral, para sismos corticales la distancia epicentral se encuentra entre 11 km y 458 km, para los sismos intraplaca de 102 km a 756 km y para los de subducción 304 km a 576 km. En dichas figuras se aprecia que los mayores valores de estas aceleraciones se presentan es sismos de tipo intraplaca y subducción para magnitudes entre siete y ocho. Mientras que en los sismos de tipo cortical se tienen las aceleraciones más pequeñas, asociadas a magnitudes alrededor de cuatro, que son las captadas hasta el momento por la red acelerográfica del servicio sismológico nacional. Lo anterior hace notar que para los sismos de subducción e intraplaca se tiene suficiente información para tomar registros representativos para los fines de esta investigación, no así para sismos corticales, ya que se carece de registros con mayor intensidad por lo que se tuvo que optar por obtener algunos acelerogramas sintéticos como más adelante se comenta.

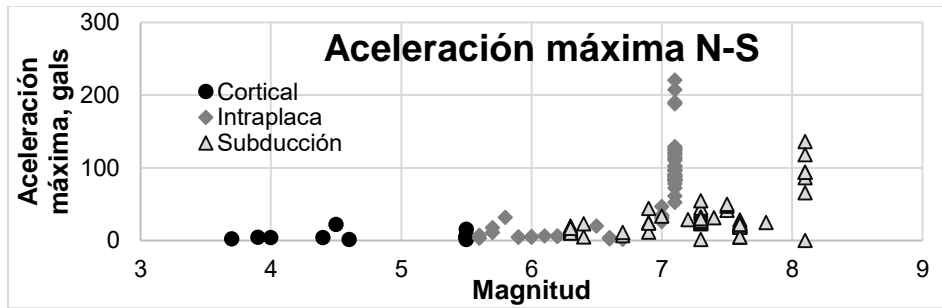


Fig. 30 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente Norte-Sur

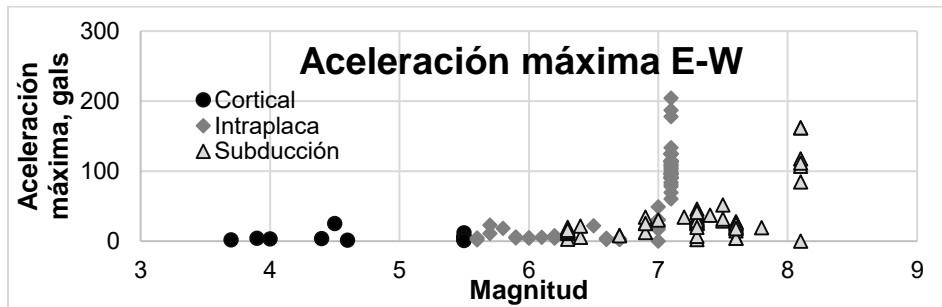


Fig. 31 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente Este-Oeste

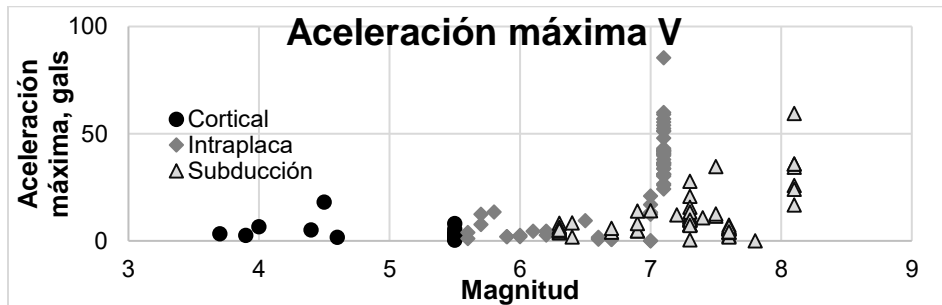


Fig. 32 Gráfica de aceleración máxima del terreno contra magnitud en la componente vertical

En la figura 33 se muestran las curvas de sismicidad regional para las tres fuentes sísmicas analizadas donde se puede ver la tasa de excedencia y la magnitud de los sismos.

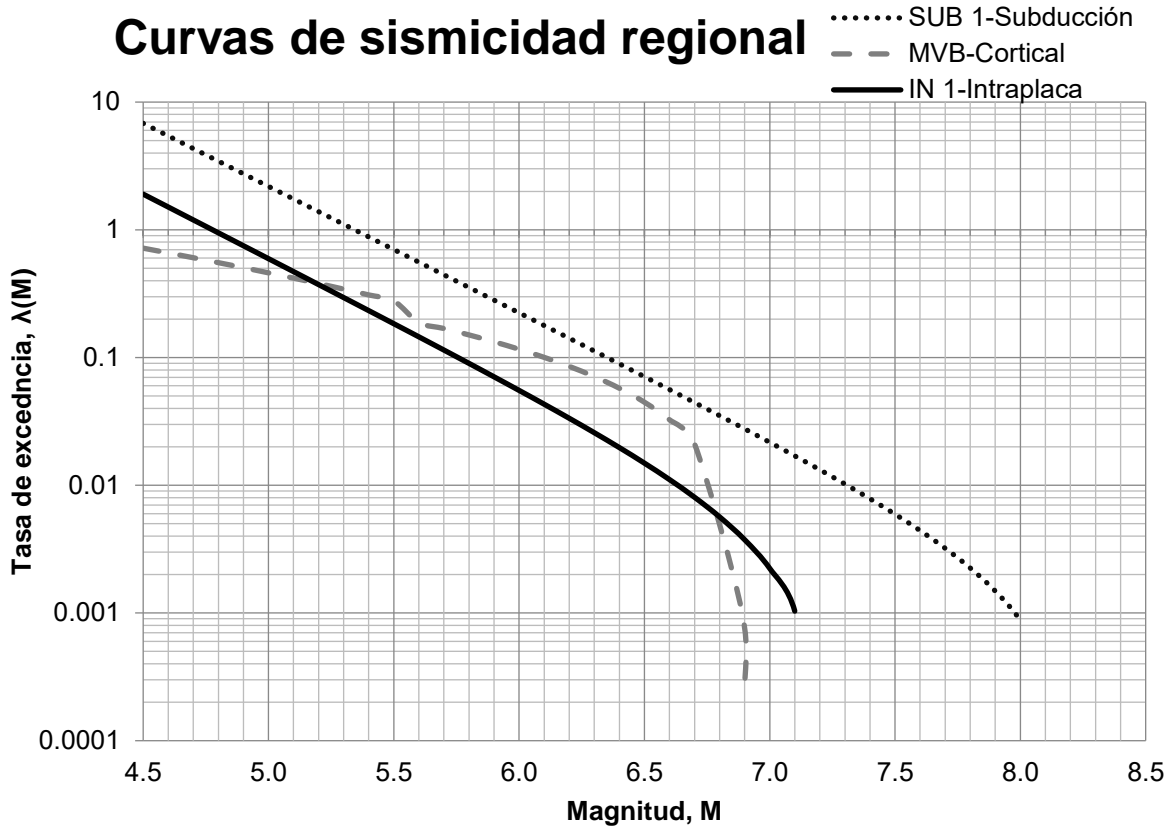


Fig. 33 Curvas de sismicidad regional (Rivera & Sánchez, 2018)

Simulación de sismos corticales. Finalmente, por la poca información de los sismos de tipo corticales se ocupó el programa PRODISIS para simular sismos en el municipio de Acambay para los sismos de supervivencia se ocupó un periodo de retorno de 1000 años y para los sismos de servicio un periodo de 50 años.

Las simulaciones en PRODISIS son en roca y para este estudio era importante que el registro fuera en la superficie y en suelo blando por lo que se optó por hacer una evaluación de efecto de sitio en una dimensión con el programa DEEPSOIL. Se ocupó un análisis lineal en el dominio del tiempo con un solo estrato de arcilla de 53 m de espesor, un peso volumétrico de 1.25 t/m^3 , una velocidad de onda de cortante de 53 m/s y una razón de amortiguamiento de 5%. Se tomó en cuenta un semi-espacio elástico con las propiedades típicas de una roca con una velocidad de onda de cortante de 5000 m/s. En las figuras 34 (sismos de supervivencia) y 35 (sismos de servicio) se presentan los espectros de pseudoaceleración de la señal en roca y la señal con efectos de sitio; se puede observar que la pseudoaceleración máxima es menor en el espectro que tiene los efectos de sitio, pero la respuesta máxima cambia de posición a un lugar más cercano al periodo fundamental del suelo que se ocupó.

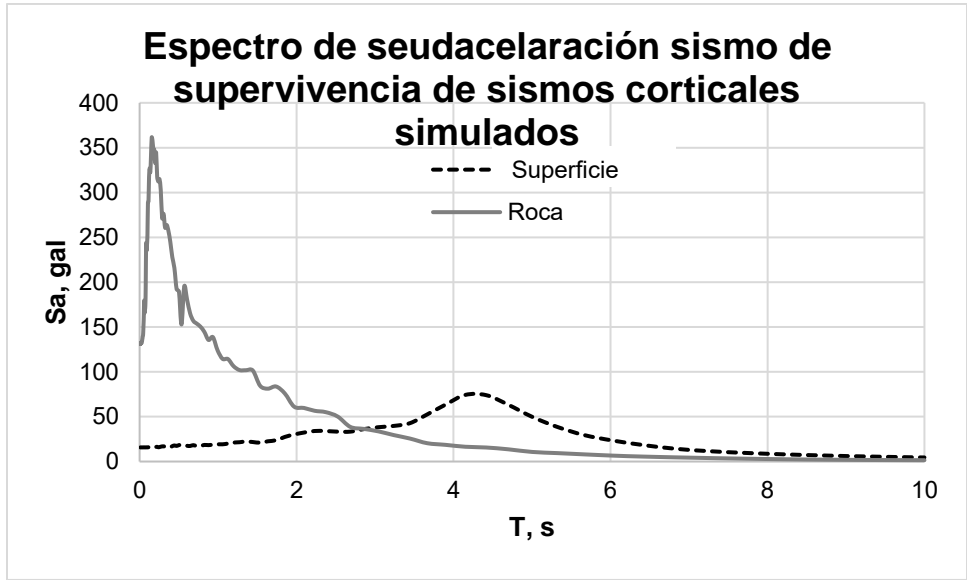


Fig. 34 Espectros de pseudoaceleración sismo de supervivencia

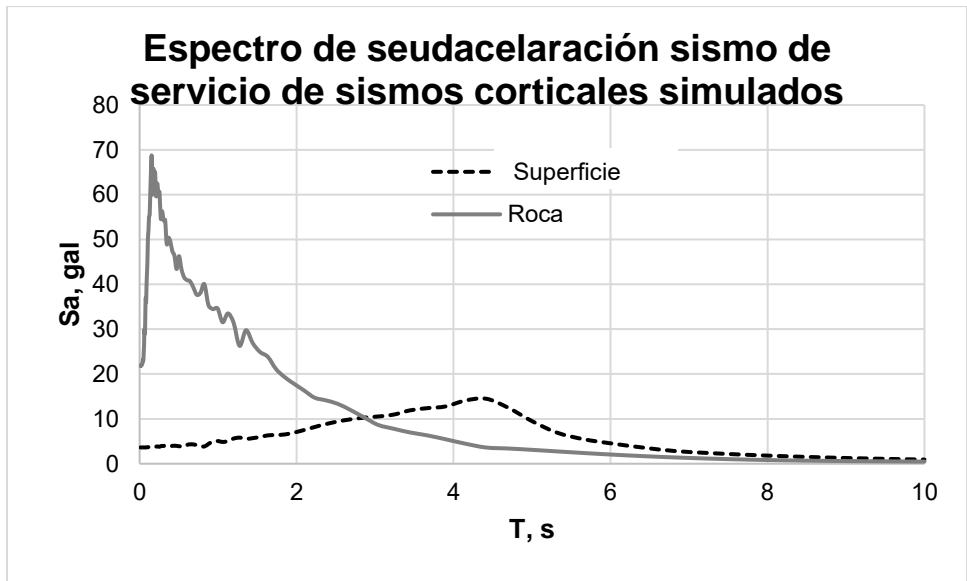


Fig. 35 Espectros de pseudoaceleración sismo de servicio

Sismos representativos. Debido a que no existe un estudio que establezca los periodos de retorno o las tasas de excedencia para revisar los niveles de desempeño contemplados en este estudio, se consideró para el diseño por supervivencia los sismos de mayor intensidad registrados hasta el momento, tales como 19-septiembre-1985 (M=8.1) para los sismos de subducción y 19-septiembre-2017 (M=7.1) para los sismos intraplaca. En tanto, para el diseño por servicio se consideraron aquellos con periodo de retorno de 50 años. Para edificios Bazán y Meli (2004), proponen para el estado de servicio, un periodo de retorno de 20-30 años y para la integridad estructural un periodo que va entre 50 y 100 años. Sin embargo, por la importancia que tienen los puentes, su poca redundancia y la necesidad de ocupación (uso) inmediata después de un evento sísmico, en este trabajo se consideró que el periodo de 30 años no es suficiente para el estado límite de servicio y se

decidió utilizar el de 50 años relacionado a la integridad estructural para edificios. En la tabla 10 se presentan los acelerogramas representativos ocupados.

Tabla 10 Sismos representativos

| Clave | Fecha | Ts s | Tr años | M | A _{max} N-S cm/s ² | A _{max} E-W cm/s ² | A _{max} V cm/s ² | R km | Suelo estación | H km | Z km | Fuente sísmica | Tipo de evento |
|------------------------|------------|---------|------------|--------|--|--|--|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|-------------------|
| SCT18509 | 19/09/1985 | 7 | 1000 | Mc=8.1 | 93.8 | 161.6 | -35.8 | 446 | Arcillas | 2240 | 15 | Subducción | Extremo |
| TLHD8509 | 21/09/1985 | 2.3 | 160 | Mc=7.5 | 49.4 | 51.6 | 34.6 | 306 | Arcillas | 2240 | 15 | Subducción | Moderado |
| JC5420170 919181440 | 19/09/2017 | 1.2 | 1000 | Mc=7.1 | 220.3 | 204.1 | 59.9 | 111 | Arcillas | 2237 | 57 | Intraplaca | Extremo |
| DFVG9906 | 15/06/1999 | 2.5 | 50 | Me=7.0 | -34.8 | -48.6 | -20.9 | 226 | Arcillas | 2240 | 69 | Intraplaca | Moderado |
| Acambay 1000 | - | 4 | 1000 | - | 12.4 | - | - | - | Arcillas | - | - | Cortical* | Extremo |
| Acambay 50 | - | 4 | 50 | - | 3.6 | - | - | - | Arcillas | - | - | Cortical* | Moderado |

Notas: Clave, es la clave del registro; Fecha, es la fecha cuando ocurrió el sismo; Ts, es el periodo predominante del suelo calculado con los cocientes de NAKAMURA; Tr es el periodo de retorno de los sismos en años; M, es la magnitud del sismo; A_{max}, es la aceleración máxima del terreno en gal; R, es la distancia del epicentro a la estación en km; H, es la altitud de la estación en km; Z es la profundidad a la que ocurrió el sismo.

IV. ESTUDIO PARAMÉTRICO SOBRE EL DISEÑO SÍSMICO DE COLUMNAS DE PUENTES CON EFECTO DE ISE

4.1 Antecedentes

Para llevar a cabo este estudio sobre el diseño sísmico de columnas de puentes de concreto reforzado con efectos de ISE, se tomó como referencia el procedimiento de diseño sísmico basado en desplazamientos con efecto de ISE desarrollado por Rivera, *et al.* (2017) en razón de que es un procedimiento que trata de combinar los efectos de desplazamientos con los de ISE, a fin de obtener diseños racionales y confiables de columnas de puentes.

No obstante, dicho procedimiento no ha sido validado ante un conjunto suficiente de sismos, por lo que puede ser objeto de modificaciones para obtener diseños que satisfagan las demandas sísmicas para dos niveles de desempeño: servicio y supervivencia.

Por lo anterior, se modificó dicho procedimiento y se ocupó para diseñar ante diferentes tipos de sismos. Esto servirá para analizar la posible influencia de la fuente sísmica en los efectos de ISE y esto a su vez en el posible diseño óptimo de las columnas de puentes.

En el subcapítulo 4.2 se hará una descripción del procedimiento de diseño sísmico empleado, así como los diseños realizados para diferentes conjuntos de sismos clasificados por fuente sísmica (subducción, intraplaca y cortical) y la evaluación de las bondades del procedimiento de diseño a través de análisis no lineales paso a paso.

4.2 Procedimiento de diseño sísmico de columnas de puentes

El procedimiento de diseño desarrollado por Rivera, *et al.* (2017) se basa en conceptos de desplazamientos y considera la revisión de dos estados límites de diseño: servicio y supervivencia. En la figura 36 y 37 se ilustran los diagramas de flujo para diseñar las columnas de puentes para los citados niveles de desempeño, respectivamente.

- *Estado límite de servicio.* Se plantea que la columna debe tener pocos daños ante sismos frecuentes, en los sismos que se eligieron se definió un periodo de retorno de 50 años, estos daños deben permitir la operación inmediata del puente. Para limitar estos daños se planteó que las grietas no presenten un ancho residual mayor a 0.2 mm. El criterio de desempeño que se impone para no rebasar este límite es la fluencia del acero longitudinal (Rivera, 2005).

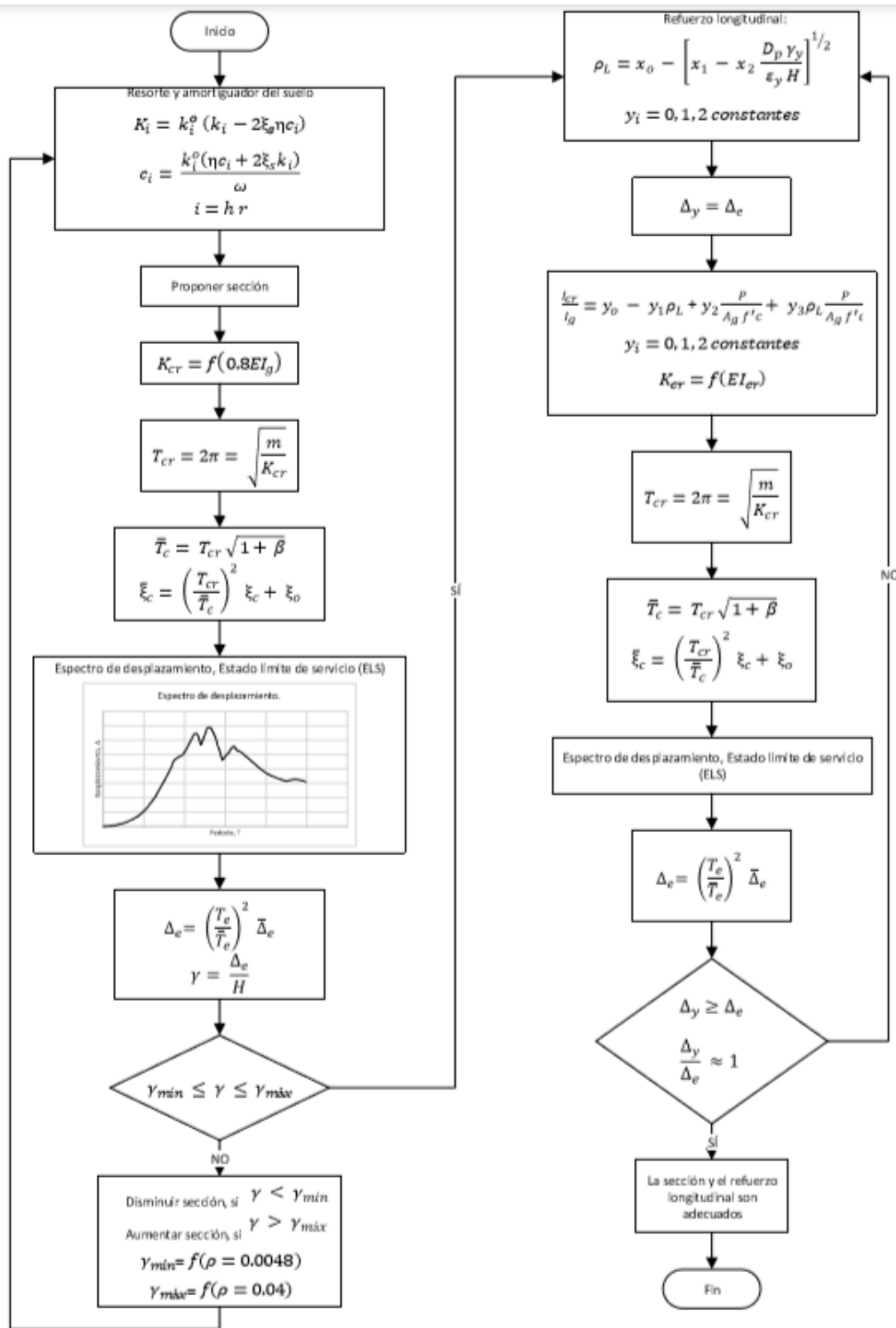


Fig. 36 Diagrama de flujo método de diseño basado en desplazamiento tomando en cuenta los efectos de ISE en condición de servicio propuesto por Rivera, et al (2017)

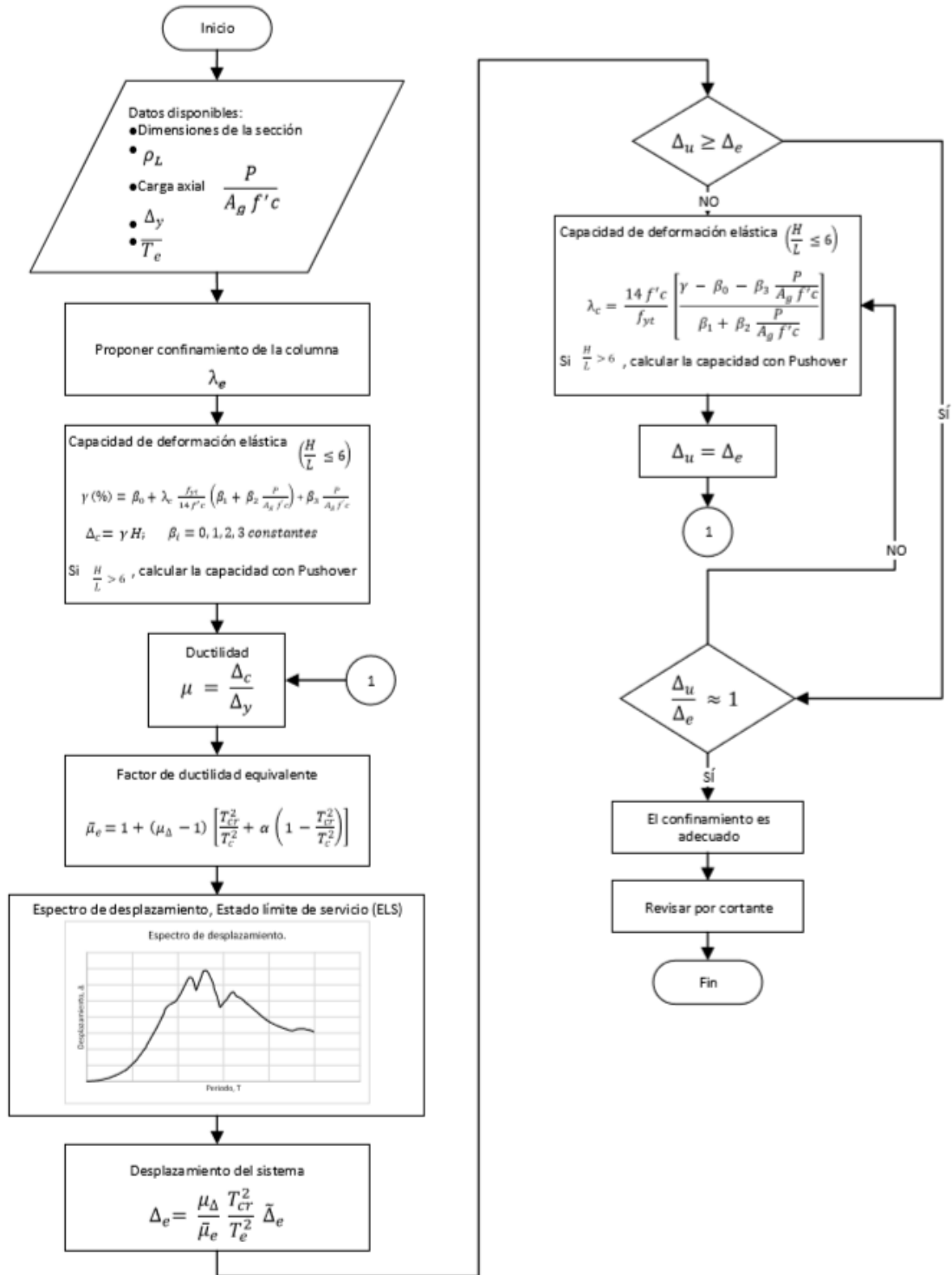


Fig. 37 Diagrama de flujo método de diseño basado en desplazamiento tomando en cuenta los efectos de ISE en condición de supervivencia propuesto por Rivera, *et al* (2017)

- **Estado límite de supervivencia.** Este límite plantea que la columna sufra daños severos sin llegar al colapso antes sismos excepcionales, en este caso se eligieron sismos con periodo de retorno de 250 años. Y para limitar este estado se ocupa la distorsión angular tomando en cuenta como falla de la columna la fractura del estribo (Rivera, 2005).

Al tomar en cuenta el efecto de la ISE el desplazamiento relativo entre el extremo superior de la columna y el extremo inferior es presuntamente menor al de una columna empotrada, por lo que esto puede favorecer a tener una menor demanda de desplazamientos y distorsión angular. Otro posible beneficio es el aumento del amortiguamiento efectivo.

A continuación, se describe el procedimiento de diseño modificado que se ocupó para hacer el estudio paramétrico de las columnas de concreto reforzado.

0. Obtener los datos iniciales que están divididos en 5 categorías

a. Datos del suelo

- T_s periodo del suelo
- H_s Profundidad al estrato resistente
- γ_s Peso volumétrico del suelo
- ν_s módulo de Poisson del suelo
- V_s Velocidad de onda de cortante del suelo

$$V_s = \frac{4H_s}{T_s}$$

- G_s Módulo de rigidez a cortante del suelo

$$G_s = V_s^2 \frac{\gamma_s}{g}$$

- E_s Módulo de elasticidad del suelo

$$E_s = 2G_s(1 + \nu_s)$$

- ζ_s fracción de amortiguamiento crítico del suelo

b. Datos de la cimentación superficial

- $Ancho$ ancho de la cimentación
- $Largo$ largo de la cimentación
- Ac área de la cimentación
- I momento de inercia en la dirección del análisis
- D_f profundidad de desplante

c. Datos de las pilas/pilotes individuales

- E_p módulo de elasticidad del concreto de la pila
- d diámetro de la pila
- L_p longitud de la pila
- n_{pilas} número de pilas
- $posición$ posición de las pilas

d. Datos de la columna de puente

| | |
|-----------|--|
| H_e | altura de la columna |
| f'_c | resistencia a compresión de la columna |
| E_c | módulo de elasticidad de la columna |
| A_{col} | área de la columna |
| r | recubrimiento del acero |
| ζ_e | fracción del amortiguamiento crítico estructural |
| D | diámetro de la columna |

e. Datos del refuerzo

| | |
|-------------|---|
| f_y | esfuerzo de fluencia del acero longitudinal |
| f_{yt} | esfuerzo de fluencia del acero transversal |
| E_s | módulo de elasticidad del acero |
| ρ_{st} | cuantía de acero de refuerzo transversal |
| ρ_i | cuantía de acero de refuerzo longitudinal |

1. Cálculo de las cargas sobre la columna y la masa

| | |
|-------|-----------------------------------|
| W_e | peso sobre la columna |
| M_e | masa concentrada sobre la columna |
| P | carga axial en la columna |

2. Proponer una sección que cumpla con las siguientes desigualdades:

$$\frac{H_e}{D} < 6 \quad (44)$$

Esta desigualdad se propuso porque es el rango de las columnas ensayadas por Rivera (2005) y este método tiene como base ese estudio, cumplir con esta relación ayuda para que no se presenten efectos de segundo orden geométricos y tengan buen comportamiento las columnas. Es importante destacar que la ISE aumenta estos efectos por el giro adicional en la base por lo que se debe ser más cuidadoso con esta relación que en el estudio de Rivera (2005), para columnas que exceden esta desigualdad Rivera, *et al.* (2017) proponen calcular la capacidad con un pushover, para simplificar el método se decidió que en la propuesta de la sección se definan columnas que cumplan con esta desigualdad.

Se propuso la desigualdad referida al intervalo de aplicación de la carga axial a compresión para el cálculo de la distorsión última.

$$\frac{P}{A_c f'_c} < 0.25 \quad (45)$$

3. Cálculo del periodo agrietado con la propuesta de cuantía, en el primer intento se propone la cuantía mínima. Para el cálculo de la inercia agrietada se ocupa la siguiente expresión propuesta por Rivera (2007).

I_{cr} inercia agrietada

$$\frac{I_{cr}}{I_g} = 0.22 + 13.44p_i + 0.11 \frac{P}{Af'c} - 0.16p_i \frac{P}{Af'c} \quad (46)$$

donde,

p_i cuantía de acero longitudinal
 $\frac{I_{cr}}{I_g}$ razón entre la inercia agrietada y la inercia gruesa de la sección

La ecuación para el cálculo de la inercia solo aplica para columnas de sección circular, para más información sobre la estimación de la rigidez agrietada se recomienda revisar el trabajo de Rivera *et al.* (2014).

Se calcula el periodo efectivo con las siguientes ecuaciones:

$$K_{cr} = \frac{3 Ec I_{cr}}{H^3} \quad (47)$$

$$T_{cr} = 2\pi \sqrt{\frac{Me}{K_{cr}}} \quad (48)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{cr}} \quad (49)$$

donde,

K_{cr} rigidez agrietada de la columna
 T_{cr} periodo agrietado de la columna

- Se revisa si se puede desprestigiar la interacción-suelo estructura (ecuación 1) y si es necesario se calculan los resortes horizontales y de cabeceo de la cimentación en conjunto, el periodo efectivo de la estructura y el amortiguamiento efectivo.

K_x resorte horizontal del suelo
 K_r resorte cabeceo del suelo
 \bar{T}_e periodo efectivo de la estructura
 $\bar{\zeta}_e$ amortiguamiento efectivo de la estructura

- Cálculo de la demanda sísmica de desplazamientos elásticos con sismo de servicio, $De_{servicio}$. A manera de ejemplo se muestra la figura 38.

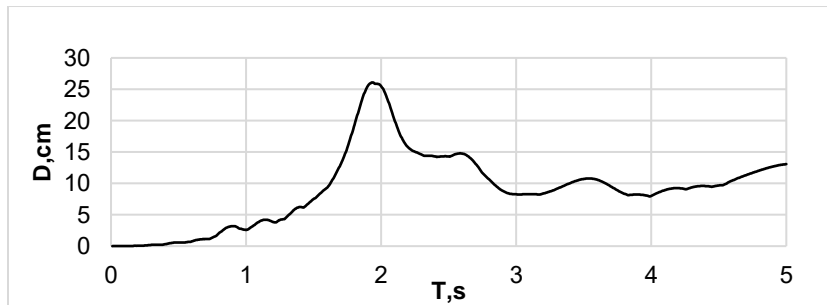


Fig. 38 Espectro de desplazamientos estación TLHD canal 3

Para obtener el $De_{servicio}$ se calcula un espectro de desplazamientos elástico con las propiedades efectivas ($\bar{T}_e, \bar{\zeta}_e$) tomando en cuenta la interacción suelo-estructura. Y para conocer el desplazamiento real de la columna se toma en cuenta el efecto de la ISE con la ecuación propuesta por Avilés (Avilés & Pérez-Rocha, 2011) de

estimación de la respuesta elástica (pre-fluencia) y como se ilustra en la figura 39 el desplazamiento efectivo equivalente del sistema, $\tilde{D}e$ con ISE se relaciona con el desplazamiento real de la columna que es la demanda de desplazamiento elástico con sismos de servicio $De_{servicio}$.

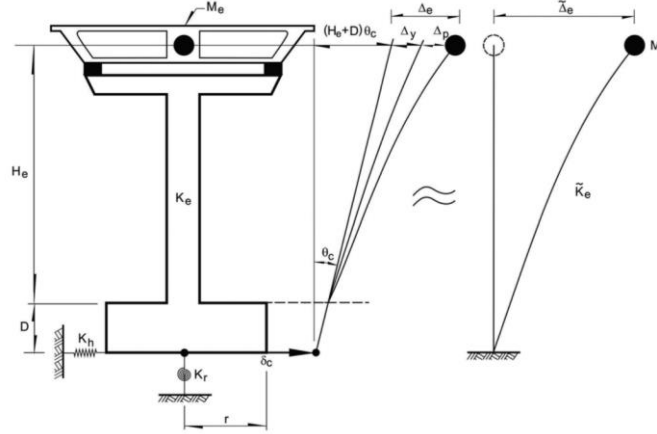


Fig. 39 Simplificación de modelo para un puente (Aviles & Pérez-Rocha, 2011)

$$De_{servicio} = \left(\frac{T_{cr}}{T_e} \right)^2 \tilde{D}e \quad (50)$$

6. Cálculo de distorsión de fluencia con cuantía máxima, cálculo de distorsión de fluencia con cuantía propuesta y cálculo de distorsión demandada por el sismo de servicio.

$$\gamma_{servicio} = \frac{De_{servicio}}{He} \quad (51)$$

$$\gamma_{max} = \gamma_y(\rho_i = max) \quad (52)$$

$$\gamma_y = \gamma_y(\rho_i = propuesta) \quad (53)$$

$$\gamma_y = \frac{1}{3} \phi_y He \quad (54)$$

$$\phi_y = 3.75 \frac{\epsilon_y}{D} (0.3 + 11.2\rho_i - 146\rho_i^2) \quad (55)$$

donde,

| | |
|---------------------|---|
| γ_{max} | distorsión de fluencia que se puede alcanzar con la cuantía máxima (0.04) |
| γ_y | distorsión de fluencia que se puede alcanzar con la cuantía propuesta (no debe ser menor a la cuantía mínima) |
| $\gamma_{servicio}$ | distorsión demandada por el sismo de servicio |
| ϕ_y | curvatura de fluencia |
| ϵ_y | deformación a la fluencia del refuerzo |

7. Comparación de distorsión demandada contra distorsión con cuantía máxima.

$$\gamma_{servicio} \leq \gamma_{max} \quad (56)$$

Si se cumple la desigualdad la sección es adecuada y si no se cumple la desigualdad se debe de aumentar la sección.

8. Comparación de demanda de servicio contra capacidad de fluencia.

$$D_y = \gamma_y H e \quad (57)$$

$$\frac{D_y}{D_{e_{servicio}}} > 1 \quad (58)$$

donde,

D_y capacidad de desplazamiento lateral de la columna cuando se presenta la fluencia del acero longitudinal.

Esta relación demuestra, qué tan cerca se encuentra el valor de la distorsión de fluencia contra la demanda de desplazamientos efectiva en la columna. Si es mayor a uno, no se presenta la fluencia en la sección con el sismo de servicio; si es menor a uno, se presentaría la fluencia con el sismo de servicio. Por lo tanto, mientras este valor sea más cercano a la unidad, la sección está trabajando como se desea.

9. Propuesta de cuantía transversal menor a 0.01. En esta propuesta se plantea que se ocupen las expresiones del reglamento AASHTO (2012) como cuantía inicial para empezar a iterar y se recomienda que no sea mayor a 0.01, para no tener problemas con el congestionamiento de acero al momento de hacer el colado.

$$\rho_{st} = 0.12 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (59)$$

10. Cálculo de la capacidad de distorsión última y su demanda sísmica de desplazamiento. Se utilizan las ecuaciones propuestas por Rivera (2005) y son las siguientes.

$$\lambda_e = \rho_{st} \quad (60)$$

$$\gamma_u = \beta_0 + \lambda_e \frac{f_{yt}}{14f'_c} \left(\beta_1 + \beta_2 \frac{P}{Af'_c} \right) + \beta_3 \left(\frac{P}{Af'_c} \right) \quad (61)$$

donde,

λ_e confinamiento efectivo
 ρ_{st} cuantía transversal

En la tabla 11 se consignan los valores de β que se usan en la ecuación 61

Tabla 11 Valores de β para sección circular

| Coefficientes | $\frac{P}{Af'c} < 0.15$ | $0.15 \leq \frac{P}{Af'c} < 0.2$ | $0.2 \leq \frac{P}{Af'c} < 0.3$ |
|----------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| β_0 | $3.3 - 0.27 \frac{He}{D}$ | $0.7 \frac{He}{D} - 3.68$ | $0.67 \frac{He}{D} - 4.19$ |
| β_1 | $453.9 + 46.5 \frac{He}{D}$ | $316.69 + 189.98 \frac{He}{D}$ | $483.26 + 121.49 \frac{He}{D}$ |
| β_2 | $14.58 - 5.71 \frac{He}{D}$ | $-(0.38 + 7.15 \frac{He}{D})$ | $-(8.48 - 3.79 \frac{He}{D})$ |
| β_3 | $0.0422 \frac{He}{D} - 0.37$ | $0.097 - 0.02 \frac{He}{D}$ | $0.12 - 0.018 \frac{He}{D}$ |

$$Du = \gamma_u He \quad (62)$$

donde,

γ_u capacidad de distorsión última
 Du capacidad de deformación última

11. Cálculo de ductilidad y ductilidad efectiva. La ductilidad de desplazamientos de la columna (μ) dada por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{Du}{D_y} \quad (63)$$

Para el cálculo de la ductilidad efectiva, tomando en cuenta la ISE se ocupa la propuesta de Avilés (Avilés & Pérez-Rocha, 2011) con un $\alpha = 0$ para representar un material elastoplástico

$$\tilde{\mu} = 1 + (\mu - 1) \frac{T_{cr}^2}{\tilde{T}_e^2} \quad (64)$$

donde,

$\tilde{\mu}$ ductilidad efectiva con ISE

12. Cálculo de la demanda sísmica de desplazamiento con sismo de supervivencia, a partir de propiedades efectivas del sistema. A manera de ejemplo, se muestra la figura 40

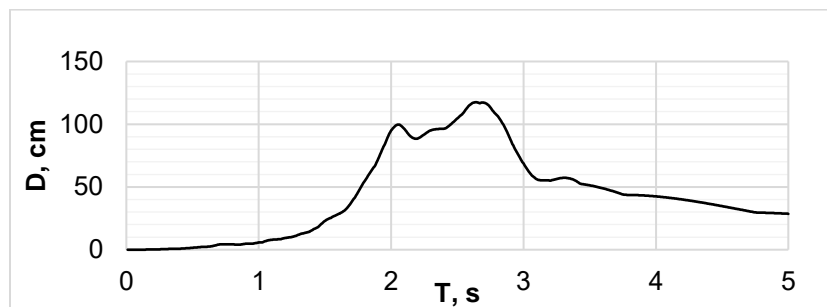


Fig. 40 Espectro de desplazamientos estación SCT canal 2

Para definir la demanda de desplazamientos de supervivencia, $\bar{D}_{e\text{supervivencia}}$

se tiene que calcular un espectro elástico de desplazamientos con la razón de amortiguamiento efectiva del sistema tomando en cuenta la ISE y ocupar el periodo efectivo.

13. Cálculo de demanda de desplazamientos inelásticos asociado al sismo de supervivencia, este paso se realizó con la estimación que plantea Ordaz *et al.* (1998)

$$\beta(\tilde{\mu}) = 0.388(\tilde{\mu} - 1)^{0.173} \quad (65)$$

$$R_{\tilde{\mu}}(T) = 1 + \left(\frac{D(T)}{D_{max}} \right)^{\beta(\tilde{\mu})} (\tilde{\mu} - 1) \quad (66)$$

$$D(T) = \tilde{D}e_{supervivencia} \quad (67)$$

$$\tilde{D}i_{supervivencia} = \tilde{D}e_{supervivencia} * \frac{\tilde{\mu}}{R_{\mu}(T)} \quad (68)$$

donde,

| | |
|------------------------------|--|
| $\beta(\mu)$ | factor en función de la ductilidad |
| $R_{\mu}(T)$ | factor de reducción de fuerza |
| D_{max} | desplazamiento máximo en la superficie |
| $D(T)$ | desplazamiento del sistema en función del periodo |
| $\tilde{D}i_{supervivencia}$ | demanda de desplazamiento inelástico del sistema con ISE |

14. Cálculo de demanda de desplazamientos inelástico efectivo (Di_s) de acuerdo con Avilés y Pérez-Rocha (2011)

$$Di_s = \frac{\mu T c r^2}{\tilde{\mu} \bar{T}_e^2} \tilde{D}i_{supervivencia} \quad (69)$$

15. Se hace una revisión de la estabilidad de la cimentación contra volteo con base en la ecuación propuesta por Botero (2000)

$$\frac{ancho}{H_e} > \frac{\tilde{D}i_{supervivencia}}{H_e} \quad (70)$$

16. Comparación de demanda sísmica de desplazamientos (Di_s) contra capacidad de deformación última (Du)

$$\frac{Du}{Di_s} > 1 \quad (71)$$

17. Revisión por cortante. En esta parte se cuida que la cuantía de refuerzo transversal que se obtuvo por confinamiento de la zona de posible articulación plástica, también sea la necesaria para resistir la fuerza cortante. La ecuación que permite calcular la resistencia a cortante que proporciona el acero transversal, está dado por:

$$V_{sr} = \frac{\phi A v f_y d}{S} \quad (72)$$

Para conocer la fuerza de fluencia se estima con la ecuación (71) propuesta por Rivera (2007).

$$V_y = K_{cr} \gamma_y H e \quad (73)$$

18. Se hace el detallado final de la sección.

En la figura 41 se presenta el diagrama de flujo de este método y en el anexo 2 se presenta un programa básico para el diseño de columnas ocupando este método.

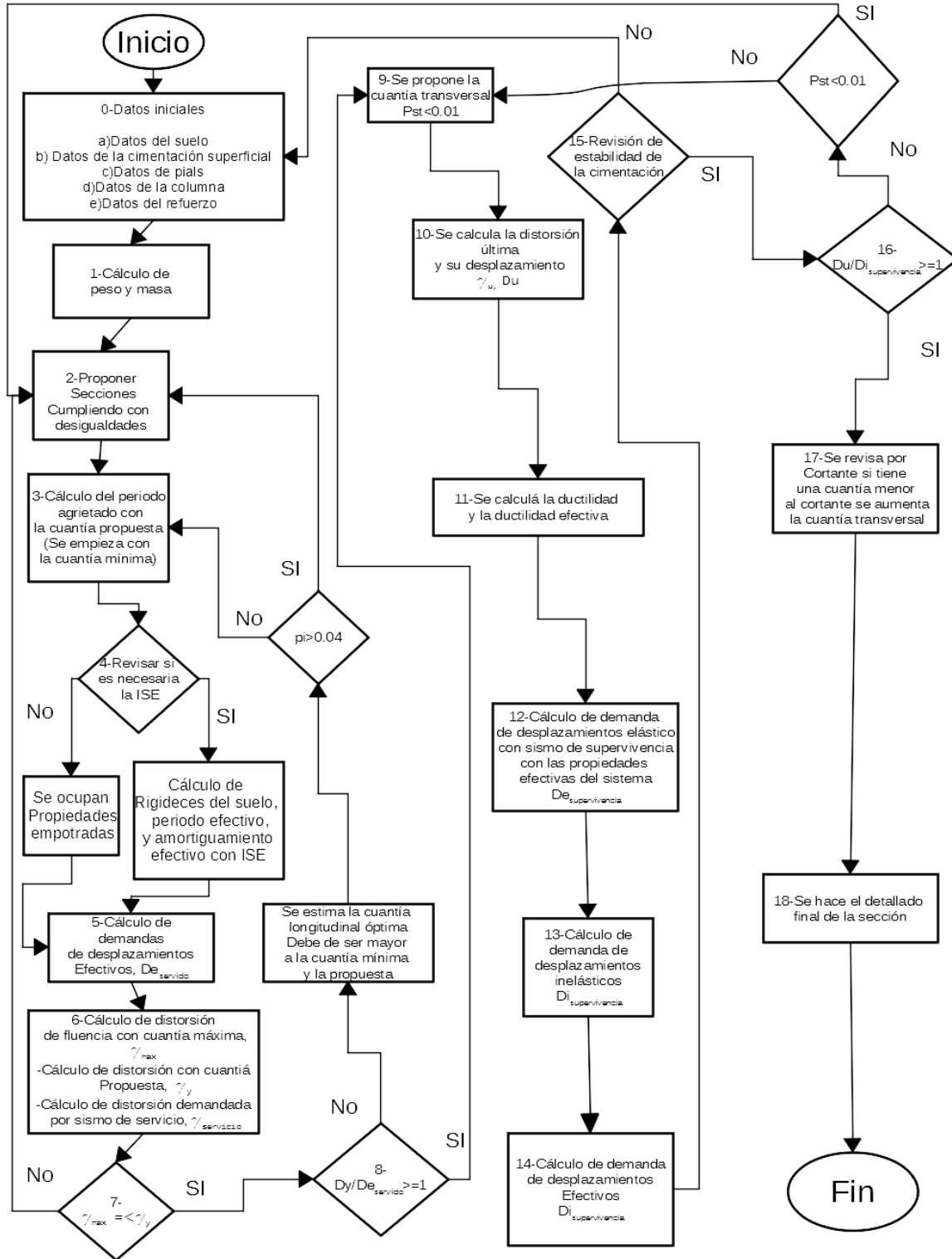
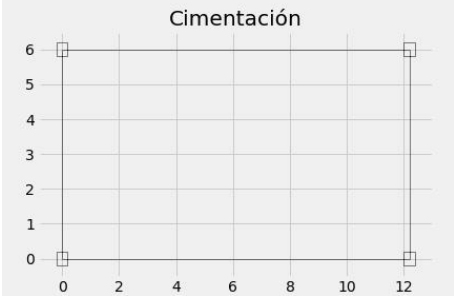
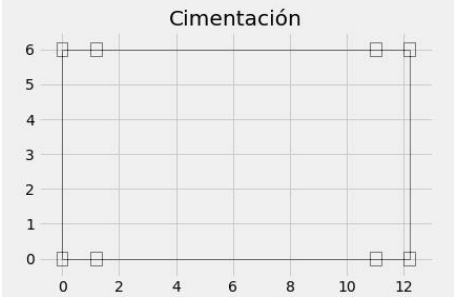
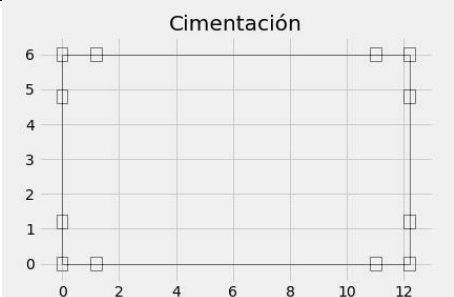


Fig. 41 Diagrama de flujo con la modificación del método de diseño

4.3 Efecto del número de pilotes en el amortiguamiento efectivo

Previo a la aplicación del procedimiento de diseño anteriormente descrito, se hizo un análisis de la influencia del número de pilotes en la variación del aumento del amortiguamiento crítico efectivo del sistema con ISE, con objeto de tener mayor claridad en la evaluación de este parámetro, que es fundamental en la estimación de la demanda sísmica de desplazamiento efectivo en las columnas de puentes. Para estudiar este efecto, se partió de una planta simétrica para dar lugar a una distribución equitativa de los pilotes, de tal forma que se inició el análisis con la colocación de cuatro pilotes en las esquinas, posteriormente se fueron colocando un número mayor, como se muestra en la tabla 12, se ocupó el efecto de grupo de los pilotes como se describió en el capítulo 2.

Tabla 12 Número de pilotes y amortiguamiento efectivo

| Número de pilotes | K_h t/m | K_r t-m | ζ | Arreglo de pilotes |
|-------------------|--------------|--------------|---------|---|
| 4 | 19990 | 1092045 | 0.085 |  <p>Cimentación</p> |
| 8 | 21186 | 1207170 | 0.101 |  <p>Cimentación</p> |
| 12 | 21739 | 1059467 | 0.109 |  <p>Cimentación</p> |

| Número de pilotes | K_h t/m | K_r t-m | ξ | Arreglo de pilotes |
|-------------------|--------------|--------------|-------|--------------------|
| 16 | 21930 | 1006357 | 0.110 | |
| 18 | 22065 | 959650 | 0.112 | |
| 22 | 22261 | 989882 | 0.118 | |
| 26 | 22398 | 989820 | 0.122 | |

De los resultados obtenidos en la tabla 12, se puede apreciar que conforme aumenta el número de pilotes, la cimentación disipa más energía, lo cual se refleja en el incremento del valor del amortiguamiento efectivo, tal como se aprecia en la figura 42.

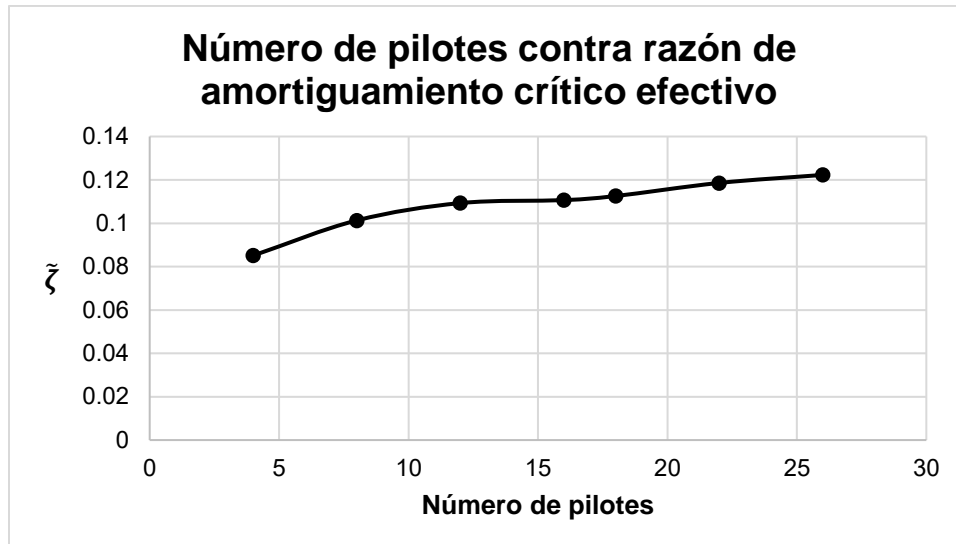


Fig. 42 Comparación de número de pilotes contra razón de amortiguamiento crítico efectivo
 ζ_{e0}

En el trabajo de Crouse y McGuire (2001) se reportan mediciones de amortiguamiento para distintas estructuras, desde puentes hasta edificios, presentando valores de amortiguamiento de 0.032 hasta 0.4; en especial, los amortiguamientos de puentes cimentados en arcillas han encontrado que durante la actividad sísmica el amortiguamiento en el sistema oscila entre 0.1-0.26 por lo que los resultados obtenidos en la figura 42 son congruentes con los reportados en estas mediciones. No se encontraron valores registrados en la República Mexicana.

4.4 Análisis de sensibilidad

Para conocer la influencia de la fuente sísmica en el diseño se realizó un análisis paramétrico con el método modificado, en la tabla 13 se resumen los sismos considerados por fuente sísmica. Se ocupó un par de sismos en una dirección (supervivencia-servicio) para revisar los diseños de cada fuente sísmica. Cabe comentar que por ser una estructura del grupo A de acuerdo con las normas técnicas complementarias (2017), las aceleraciones de los acelerogramas usados se multiplicaron por un factor de importancia de 1.5.

Tabla 13 Registros ocupados para el análisis paramétrico

| Clave | Fuente sísmica | Tipo de evento |
|------------------------|----------------|----------------|
| SCT18509 | Subducción | Supervivencia |
| TLHD8509 | Subducción | Servicio |
| JC54201709 19181440 | Intraplaca | Supervivencia |
| DFVG9906 | Intraplaca | Servicio |
| Acambay 1000 | Cortical* | Supervivencia |
| Acambay 50 | Cortical* | Servicio |

En este análisis paramétrico se ocuparon los sismos representativos de las tres fuentes sísmicas. Se hicieron 50 diseños por fuente sísmica 25 contemplando la ISE conforme al diagrama de la figura 42 y 25 con base empotrada tomando en cuenta que el periodo efectivo de la estructura no cambia ni su amortiguamiento, esto quiere decir que se ocuparon las propiedades empotradas; en este análisis se diseñaron tomando como parámetro de cambio 5 alturas y 5 pesos distintos de la columna de puente: altura de 11 m, 9 m, 7 m, 5 m y 3 m; los pesos en la columna son de 140 t, 250 t, 350 t, 450 t y 550 t. Estas combinaciones de altura y peso resultaron en relaciones de aspecto (H/D) entre 5.9-2.3 y nivel de carga axial a compresión ($\frac{P}{Acfc}$) entre 0.236 y 0.017 cumpliendo así con las restricciones impuestas para seleccionar la sección de la columna. En el anexo 3 se muestran los parámetros que se ocuparon en el diseño de las columnas.

Cuantía transversal

Para analizar la cuantía transversal en los diseños de estas columnas se hicieron seis gráficas como se observan en las figuras de la 43 a la 48. En estas gráficas se comparó la cuantía transversal contra la relación de aspecto (Fig.43 a 45) y contra el nivel de carga axial a compresión (Fig.46 a 48), para las tres fuentes sísmicas. De estas gráficas primero se puede observar que para los sismos de subducción e intraplaca la cuantía de acero es menor en la mayoría de los casos cuando se toma en cuenta la ISE y para los sismos corticales casi no existe cambio; también se observa que en la mayoría de los casos la cuantía que se requiere es menor a la que se requiere en el AASHTO; y por último se puede observar que cuando se comparan con el nivel de carga los datos tienen un ajuste aceptable a una línea recta con pendiente positiva, lo que significa que mientras el nivel de carga es mayor se requiere mayor cuantía transversal.

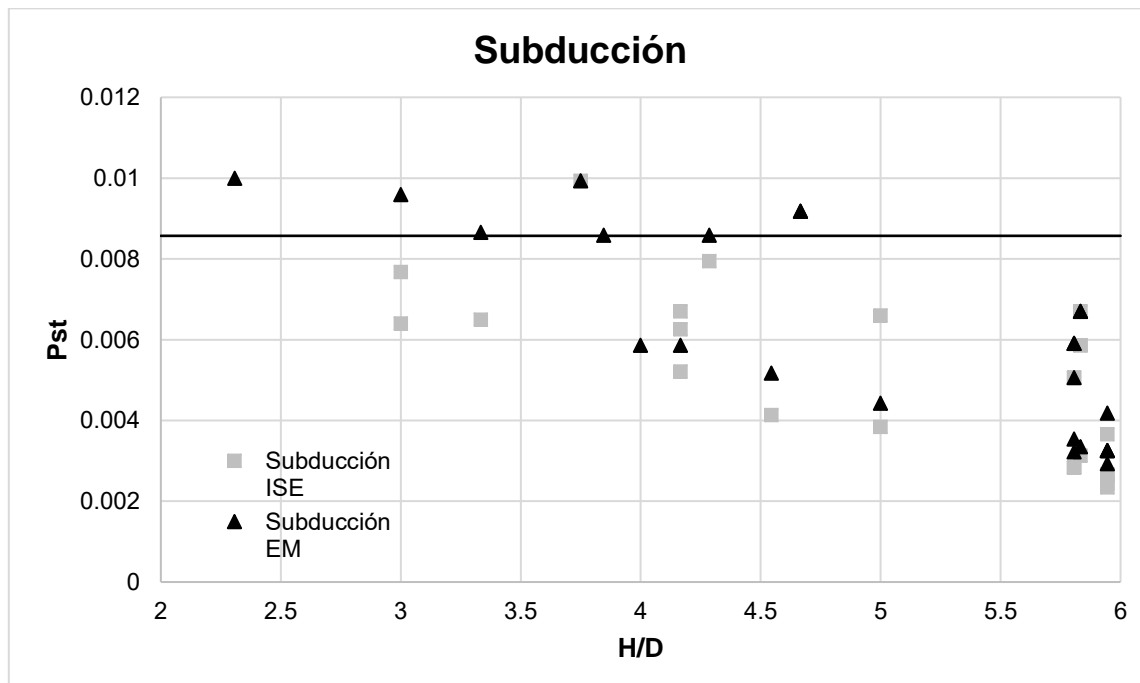


Fig. 43 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos de subducción

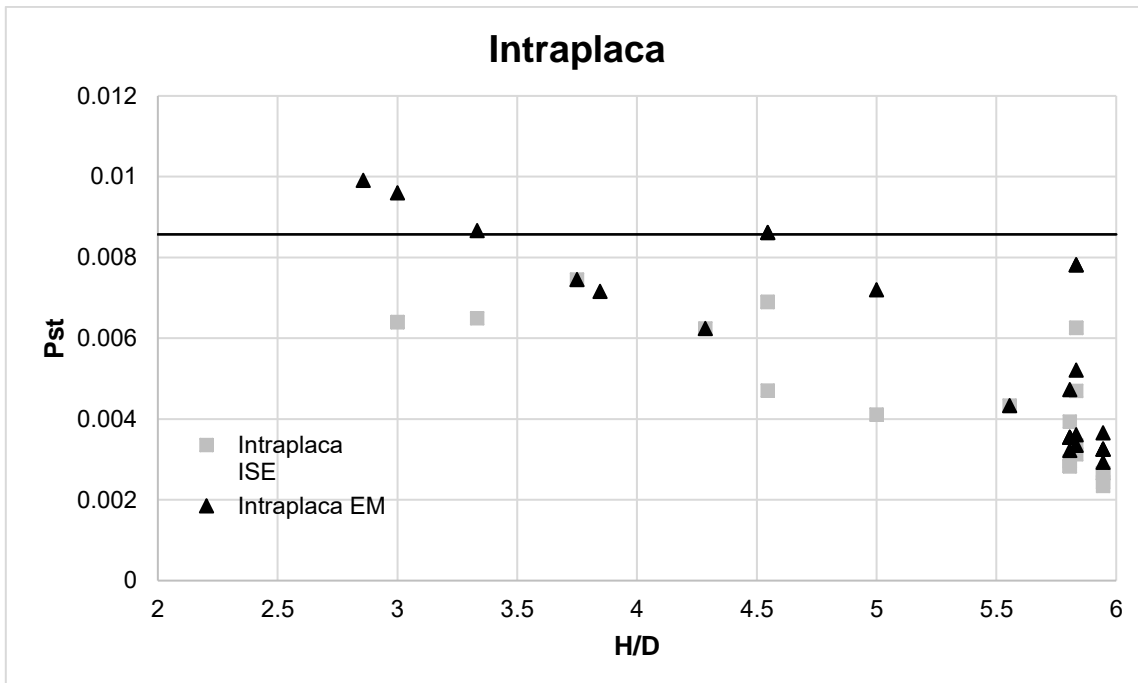


Fig. 44 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos intraplaca

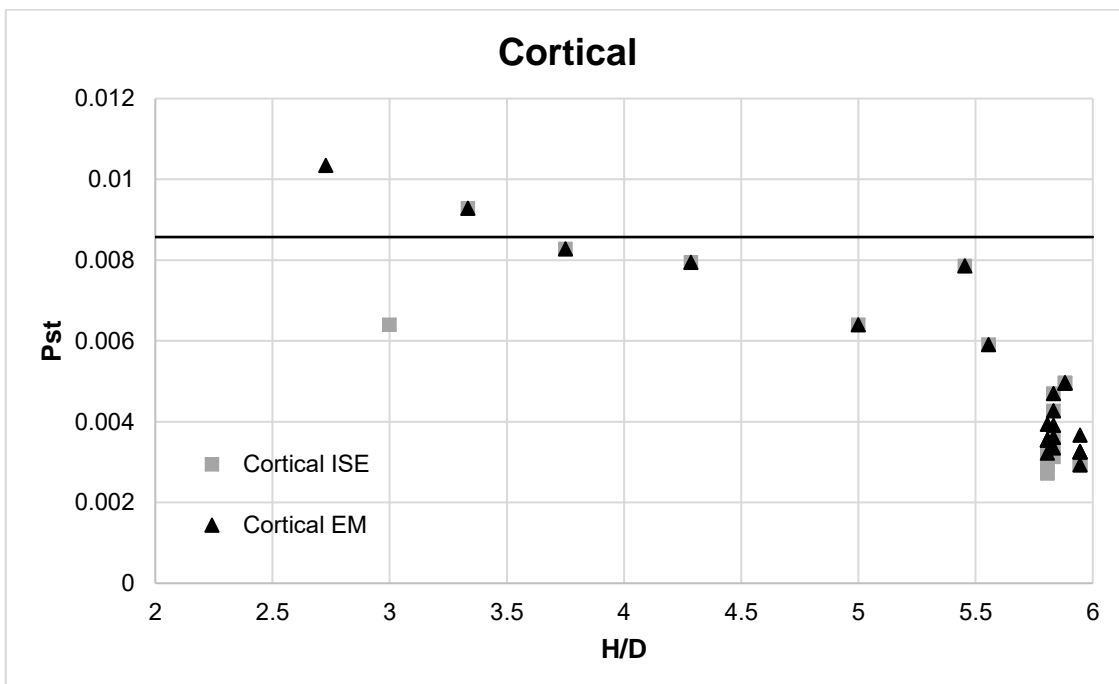


Fig. 45 Comparación de cuantía transversal contra relación de aspecto para sismos corticales

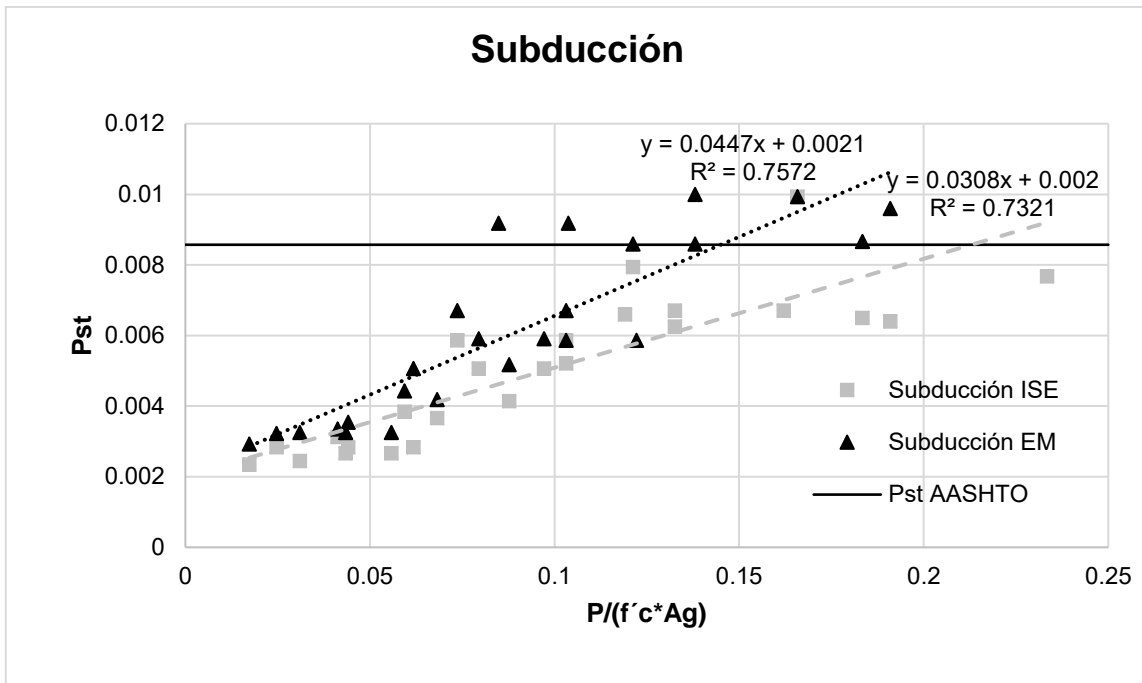


Fig. 46 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos de subducción

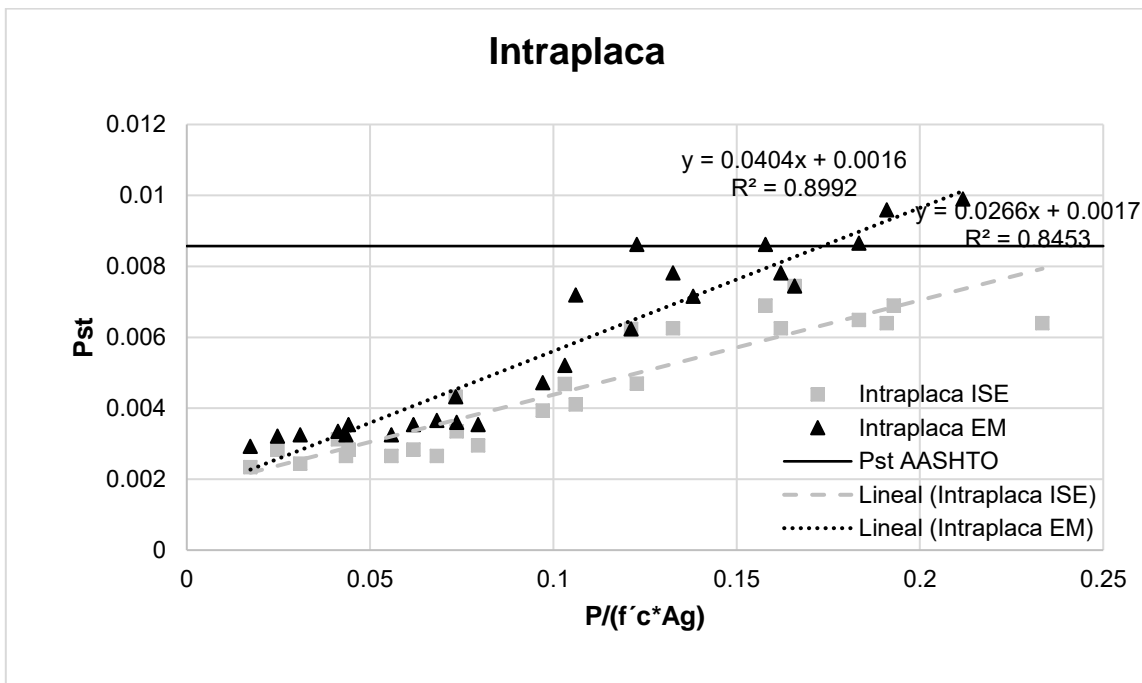


Fig. 47 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos intraplaca

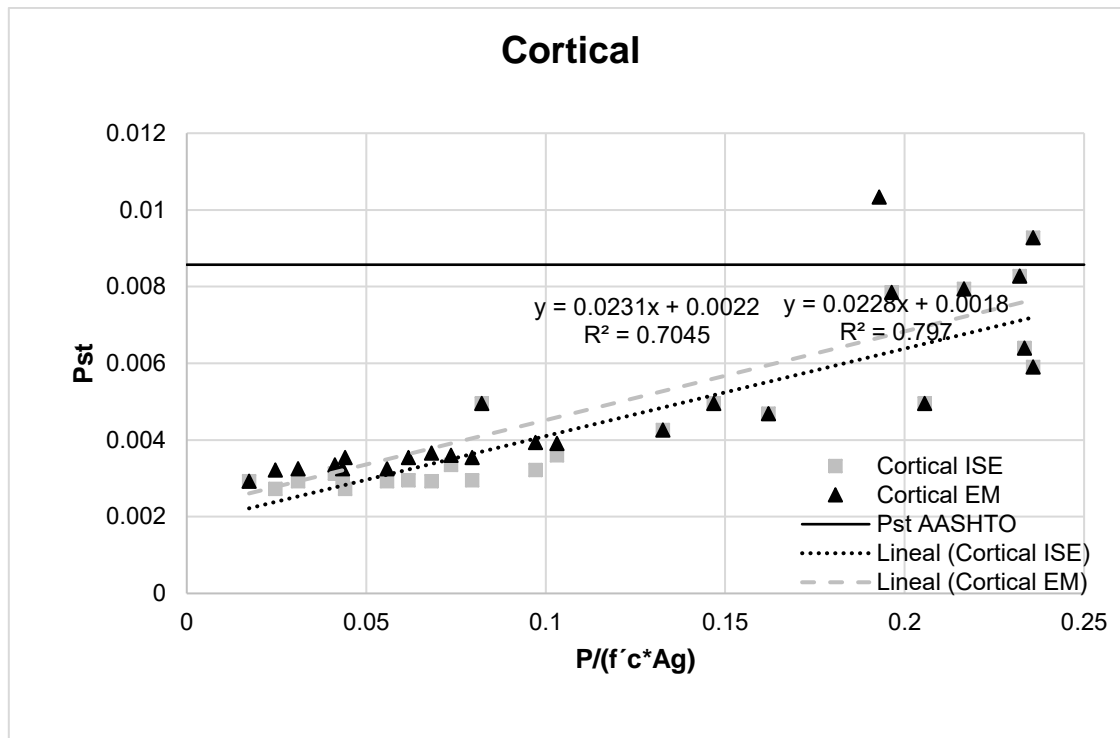


Fig. 48 Comparación de cuantía transversal contra nivel de carga axial en sismos corticales

Cuantía longitudinal

Para analizar la cuantía longitudinal se realizaron dos gráficas comparando la cuantía longitudinal contra el nivel de carga axial (Fig. 49 y 50), se eligió compararla contra la carga axial porque la mayoría de los datos comparados contra la relación de aspecto estaban agrupados en relaciones de aspecto cercanas a seis que significa que tienen el diámetro menor que se puede en comparación a la altura que tiene la columna según el método de diseño. Revisando estas gráficas se puede apreciar que cumplen con las cuantías máximas y mínimas de las NTC-2017 de sismos para tener una ductilidad alta; la mayoría de los casos tienen la cuantía mínima; el efecto de la ISE no se aprecia porque la respuesta es muy similar y en algunos casos hasta aumenta por el alargamiento del periodo. Si se comparan los sismos de subducción contra los sismos intraplaca se puede observar que los sismos de subducción requieren cuantías mayores; no se muestra la figura de los sismos corticales porque en todos los casos tiene la cuantía mínima lo que significa que la demanda de desplazamientos para esos sismos es pequeña en comparación a la capacidad de fluencia. Por último, se puede comentar que el nivel de carga no es tan relevante en la cuantía longitudinal ya que los datos tienen una dispersión grande, no obstante, con este contraste de datos se pueden apreciar las cuantías obtenidas con el diseño.

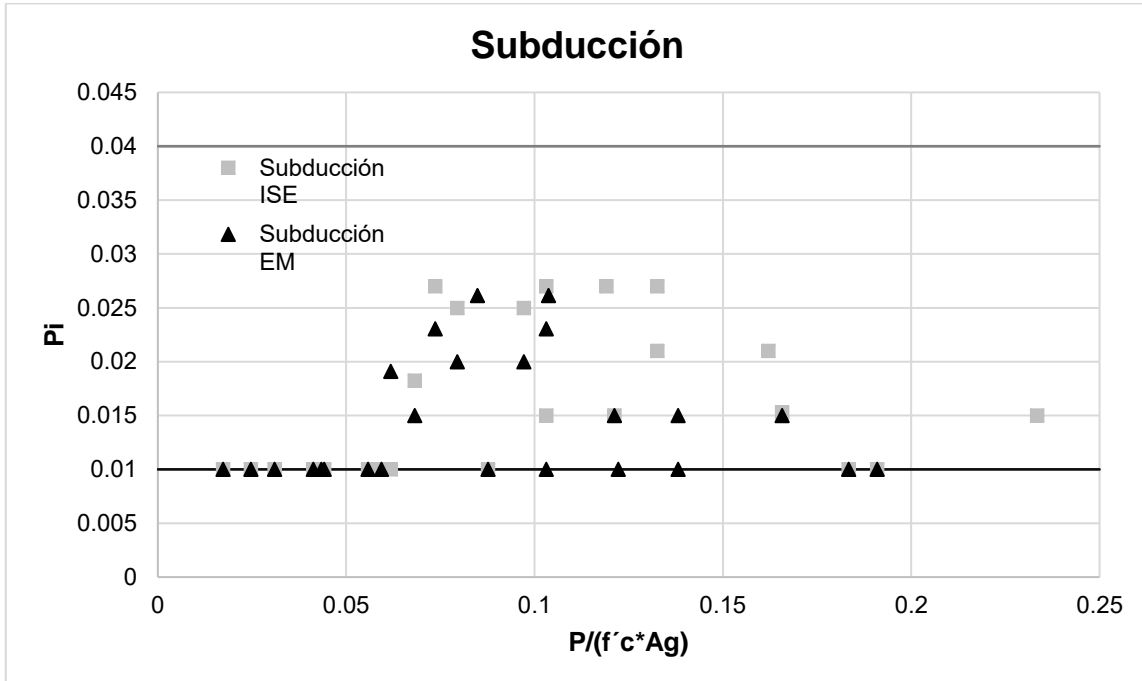


Fig. 49 Comparación de cuantía longitudinal contra nivel de carga axial en sismos de subducción

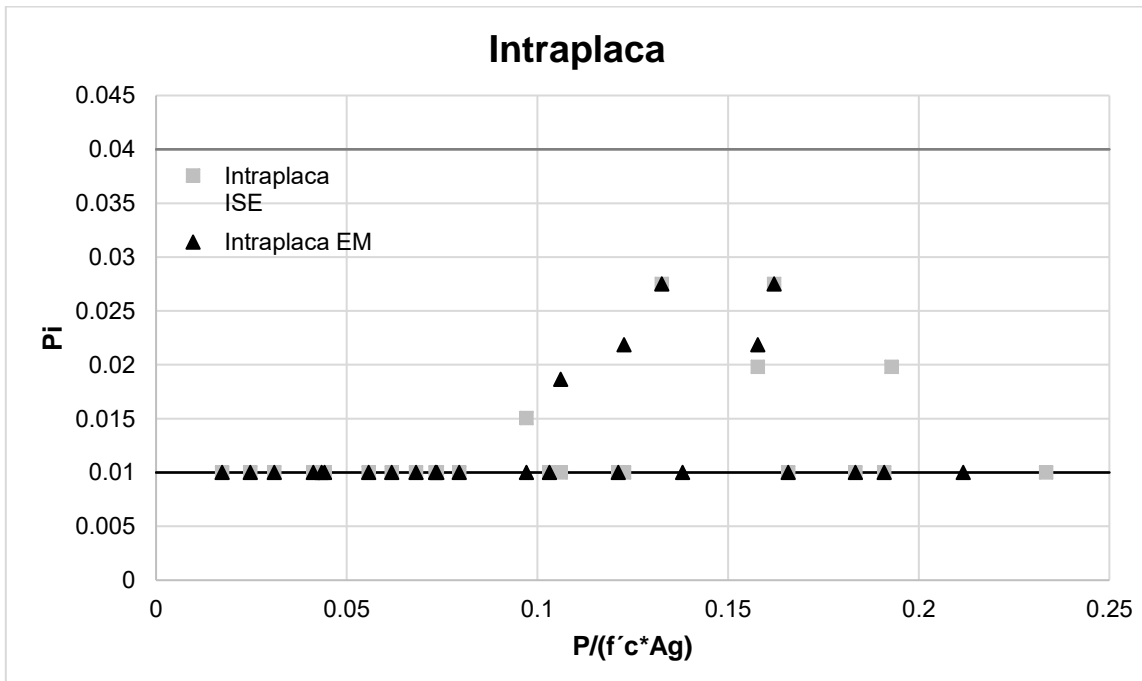


Fig. 50 Comparación de cuantía longitudinal contra nivel de carga axial en sismos intraplaca

Comparación de demanda sísmica de desplazamientos (D_i_s) contra capacidad de deformación última (D_u)

En las figuras de la 51 a la 53 se compara la demanda sísmica de desplazamientos contra la capacidad última de deformación, esta relación siempre debe de ser mayor a uno porque significa que la columna tiene la capacidad de alcanzar la demanda que le impone el sismo, en la figura 51 (sismos de subducción) y 52 (sismos intraplaca) los diseños con ISE tienen valores mayores que los empotrados lo que indica que tienen una mejor respuesta y si está más alejado de la demanda que impone el sismo; no así en los sismos corticales que la respuesta con ISE y con base empotrada son prácticamente las mismas (Fig. 53); en los sismos corticales podría parecer que este cociente es excesivo ya que llega a valores comprendidos entre 110 y 15 pero esto se debe a dos razones principalmente: la primera es que la demanda sísmica es pequeña y con las secciones mínimas que permite el método la capacidad de deformación es mucho más grande; la segunda es porque en la capacidad de deformación última está muy relacionada a la cuantía transversal y si dentro del diseño de esta cuantía rige el cortante alcanza deformaciones últimas más altas que el confinamiento que requiere para alcanzar una deformación última más cercana a la demanda sísmica. Por último, comparando los sismos de subducción y los intraplaca se puede ver que los diseños con sismos de subducción tienen valores más alejados de la unidad teniendo un promedio de 5 y en los diseños para sismos intraplaca se podría decir que tienen mejor diseño porque su promedio es de 3.

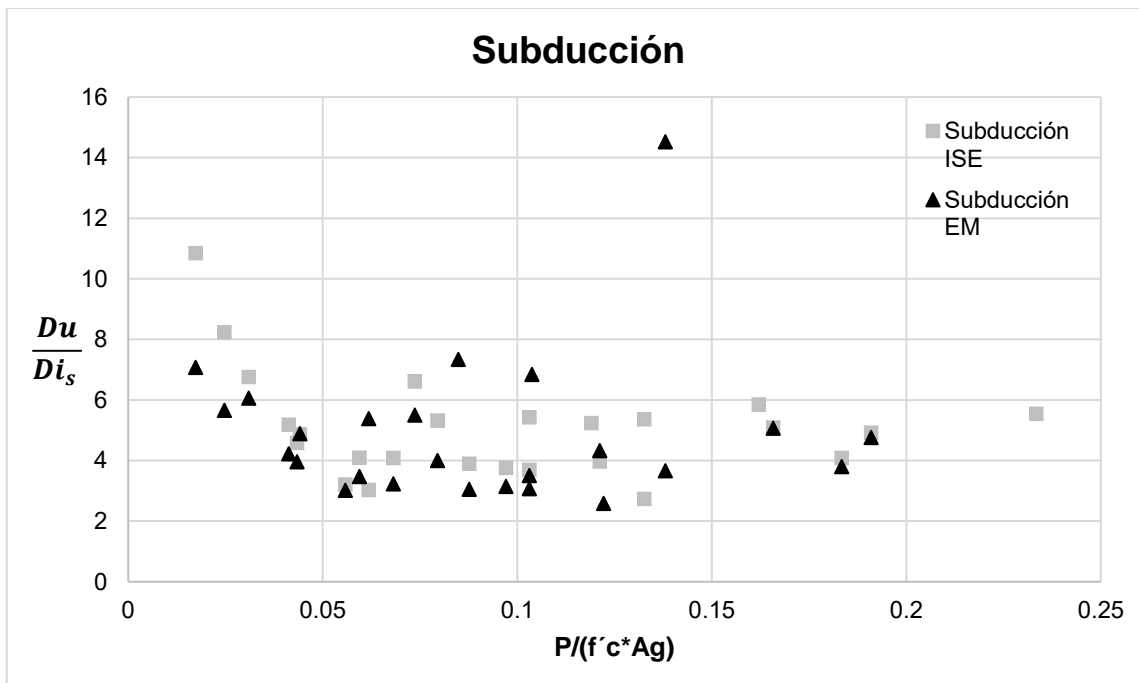


Fig. 51 Comparación de $\frac{D_u}{D_{i_s}}$ contra nivel de carga axial en sismos de subducción

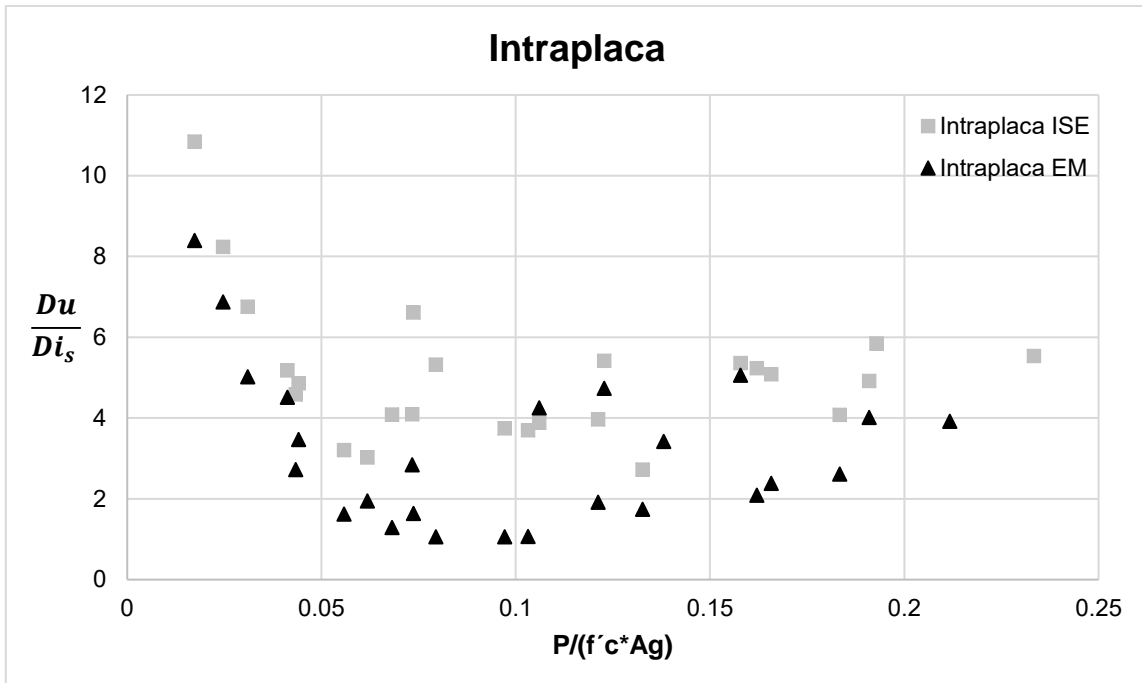


Fig. 52 Comparación de $\frac{Du}{Di_s}$ contra nivel de carga axial en sismos intraplaca

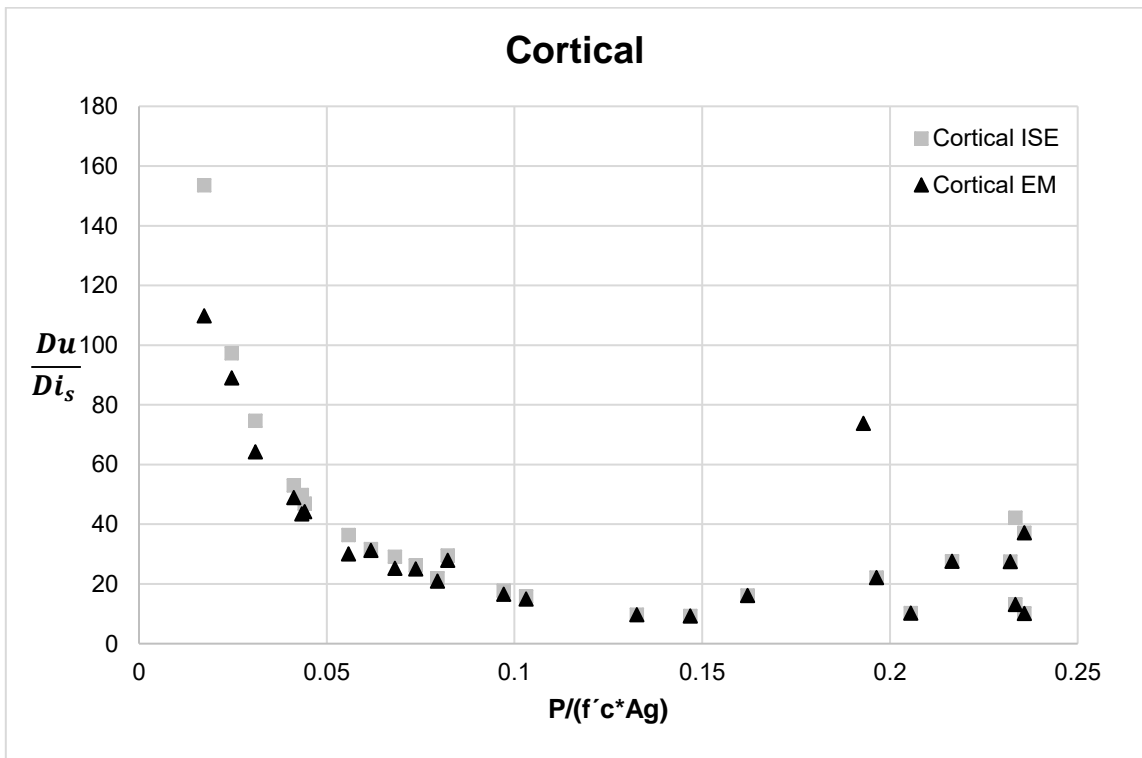


Fig. 53 Comparación de $\frac{Du}{Di_s}$ contra nivel de carga axial en sismos corticales

Comparación de demanda de servicio contra capacidad de fluencia

En las figuras de la 54 a la 56 se compara la demanda de servicio contra la capacidad de fluencia para los sismos de las tres fuentes sísmicas analizadas; se puede ver que en general la ISE no beneficia mucho este estado límite y también se ve que para sismos con niveles de carga axial menores a 0.05 la demanda de servicio es pequeña en comparación con la capacidad de fluencia. En los sismos corticales la relación de la demanda de servicio contra la capacidad tiene la misma tendencia que los sismos intraplaca y de subducción, pero con capacidades de fluencia mucho más grandes que las demandas de servicio, lo que podría indicar que los sismos escogidos para esta fuente son de magnitudes mínimas y que si se ocuparan relaciones de esbeltez mayores se podría acercarse más al diseño óptimo, es importante recalcar después de estos resultados que si se revisaran los efectos de segundo orden en el método los diseños de columnas para sismos con intensidades menores a las habituales (subducción, intraplaca) se podrían optimizar, en este estudio no se realizó para poder comparar los beneficios de la ISE sin que intervinieran más variables.

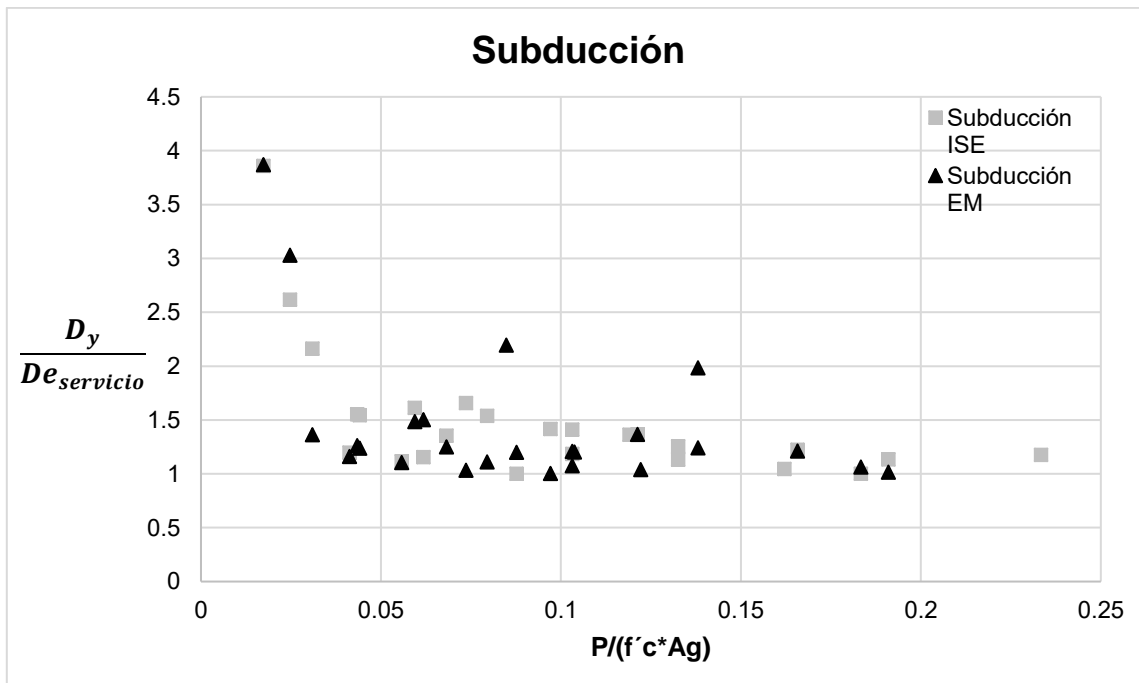


Fig. 54 Comparación de $\frac{D_y}{D_{e_{servicio}}}$ contra nivel de carga axial en sismos de subducción

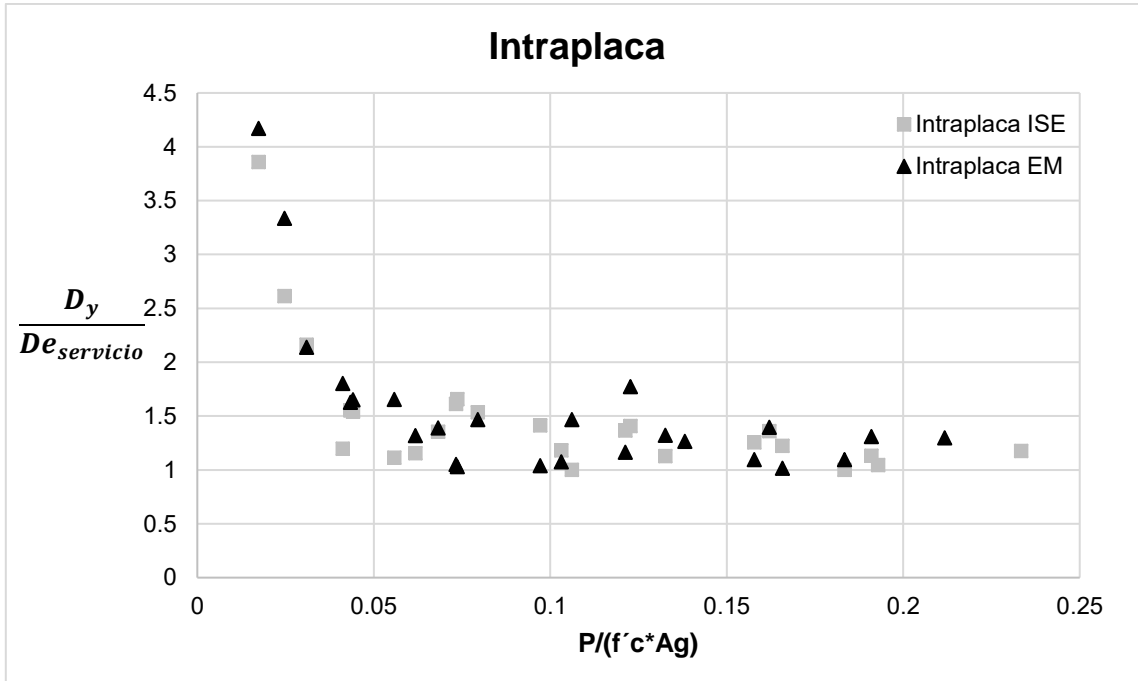


Fig. 55 Comparación de $\frac{D_y}{De_{servicio}}$ contra nivel de carga axial en sismos intraplaca

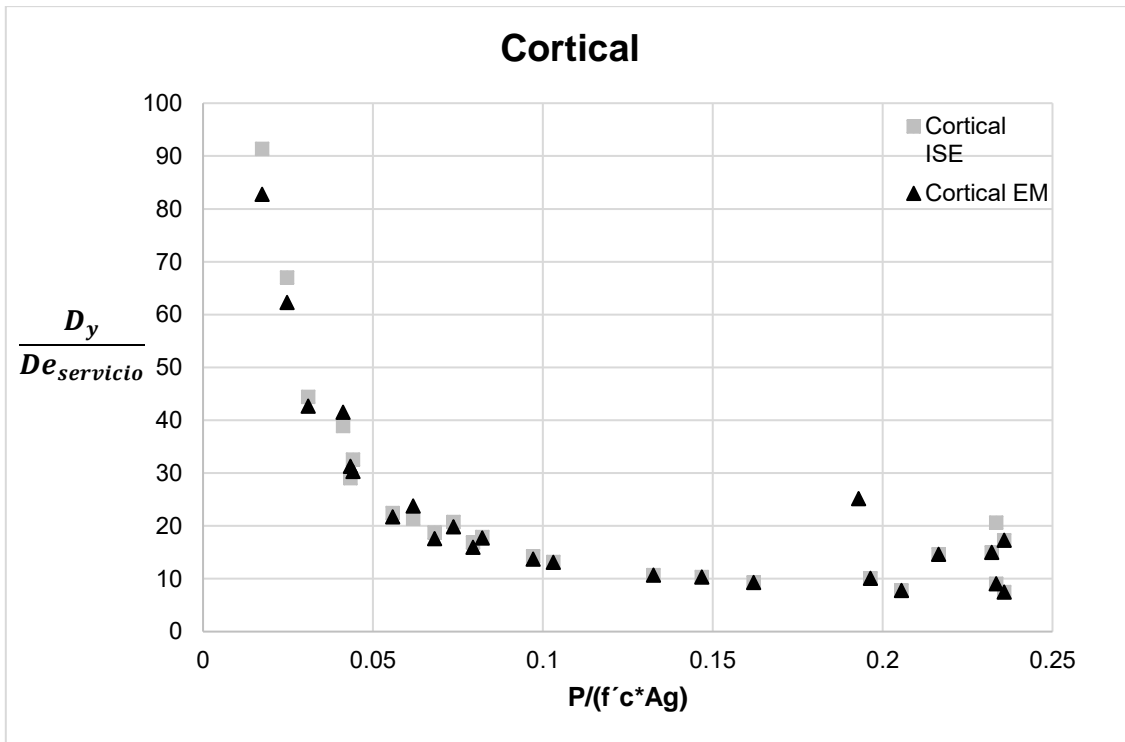


Fig. 56 Comparación de $\frac{D_y}{De_{servicio}}$ contra nivel de carga axial en sismos corticales

4.5 Análisis dinámico paso a paso

Se realizó un análisis dinámico no lineal paso a paso para evaluar la bondad del procedimiento de diseño, en cuanto a su precisión. Para lograr lo anterior se comparó la respuesta obtenida de este tipo de análisis con la respuesta esperada de acuerdo con el diseño de la columna. A continuación, se describen las características del modelo usado para llevar a cabo dichos análisis, así como las características de los diseños de columnas de puentes que fueron objeto de estos análisis no lineales para revisar la respuesta de los diseños con un método más preciso y se comparó la respuesta del análisis tomando en cuenta la interacción suelo estructura y con un modelo empotrado.

Modelo

El modelo y análisis se realizó con el programa SeismoStruct (2018) al considerar que ha sido calibrado con resultados experimentales de especímenes con una buena aproximación según Rivera (2005). Se representó con un modelo de un grado de libertad empotrado y con los resortes del suelo (Figura 57). En los análisis no lineales se ocupó un elemento con plasticidad distribuida con cuatro secciones de integración y 300 fibras. Para modelar los resortes del suelo se ocupó un modelo link lineal con las propiedades de rigidez horizontal y rigidez de cabeceo. El amortiguamiento se calculó con un amortiguamiento clásico de Rayleigh.

Se ocuparon los sismos representativos e igual que en el diseño se multiplicaron por un factor de importancia de 1.5.

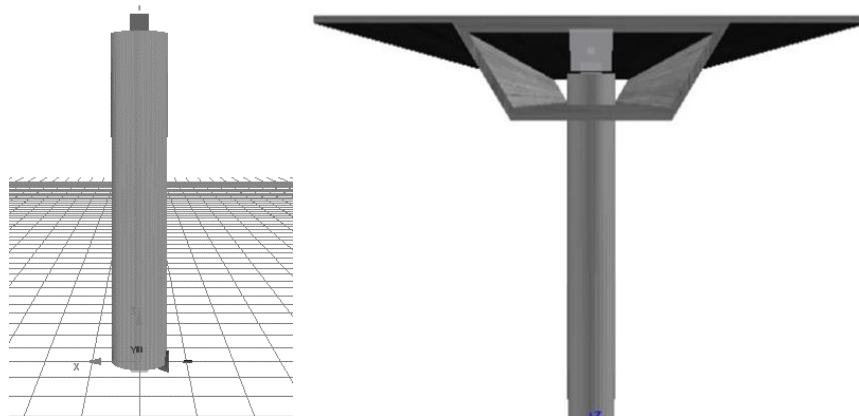


Fig. 57 Columna tipo para el análisis no lineal (Rivera, *et al.* 2017)

Los modelos constitutivos del material que se ocuparon son los siguientes:

Para el concreto se empleó el modelo no lineal de Mander con las propiedades que se describen a continuación. En la figura 58 se aprecia la curva de esfuerzo deformación con las propiedades ocupadas.

- $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$
- $E_c = 242487 \text{ kg/cm}^2$
- $\varepsilon_{pico} = 0.0028$
- $w = 2.4 \text{ t/m}^3$

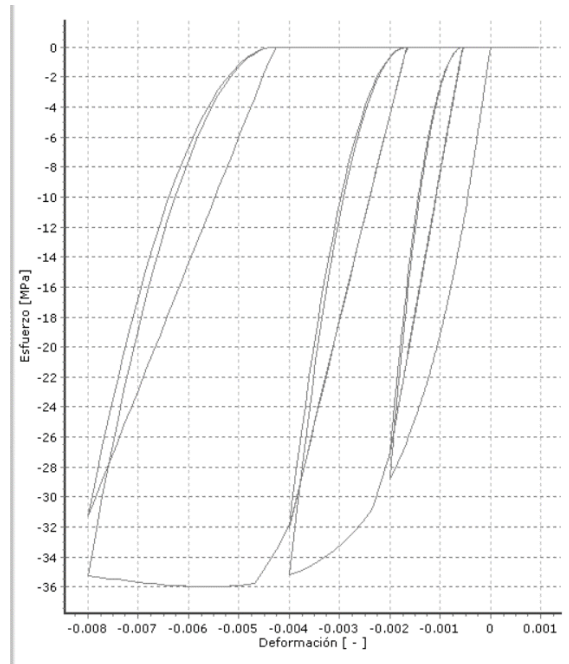


Fig. 58 Modelo de Mander

Para el acero longitudinal se ocupó el modelo de Menegotto-Pinto con las propiedades que se comentan a continuación. En la figura 59 se puede observar su curva de esfuerzo deformación.

- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- $E_s = 2100000 \text{ kg/cm}^2$
- *Endurecimiento por deformación* = 0.008
- $w = 7.7 \text{ t/m}^3$

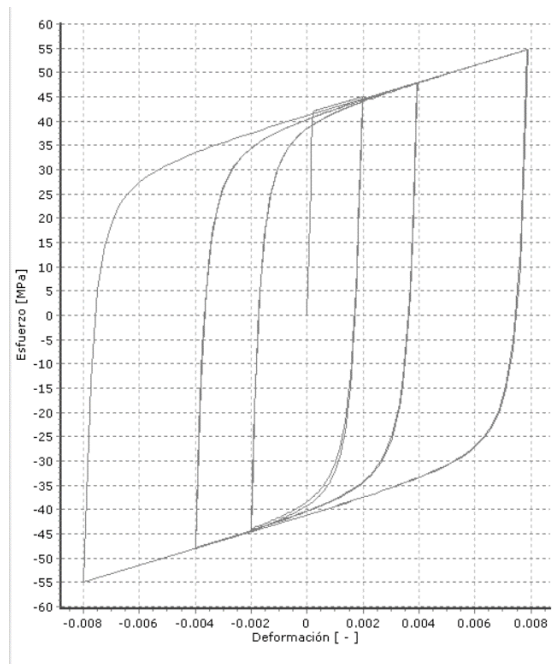


Fig. 59 Modelo de Menegotto-Pinto

Características de las columnas diseñadas

Se consideró una muestra de cinco columnas, diseñadas con tres tipos de sismos (subducción, intraplaca, cortical); se eligieron estas columnas para abarcar casos representativos de los diseños realizados en el subcapítulo anterior. En las tablas 14,15 y 16 se muestran las características de las columnas diseñadas.

Para identificar las columnas se ocupó una nomenclatura que se relaciona con su diseño, primero se ocupó el tipo de sismo (Sub:subducción, Int:intraplaca y Cort:cortical) , después la altura de la columna ($h_{11}:H_e = 11\text{ m}$, $h_9:H_e = 9\text{ m}$, $h_7:H_e = 7\text{ m}$, $h_5:H_e = 5\text{ m}$, $h_3:H_e = 3\text{ m}$) y por último la fuerza axial con la que se diseñó ($P_{140}:P = 140\text{ t}$, $P_{250}:P = 250\text{ t}$, $P_{350}:P = 350\text{ t}$, $P_{450}:P = 450\text{ t}$, $P_{550}:P = 550\text{ t}$).

Tabla 14 Diseño de columnas con sismos de subducción

| Subducción | | | | | |
|----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nomenclatura | Subh11P140 | Subh9P550 | Subh7P250 | Subh5P350 | Subh3P450 |
| Resortes | | | | | |
| $K_x, \text{ t}$ | 23151 | 23753 | 23422 | 23148 | 22698 |
| $K_r, \text{ t-m}$ | 1048037 | 1070390 | 1058994 | 1047898 | 1029988 |
| $\bar{\zeta}_e$ | 0.088 | 0.072 | 0.072 | 0.092 | 0.128 |
| Datos de la columna | | | | | |
| $D, \text{ m}$ | 1.85 | 1.55 | 1.2 | 1.2 | 1 |
| $r, \text{ m}$ | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| $dv, \text{ m}$ | 50.8 | 50.8 | 44.45 | 44.45 | 31.75 |
| $Nvar$ | 14 | 22 | 20 | 11 | 10 |
| $dvh, \text{ m}$ | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| $s_e, \text{ m}$ | 0.25 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.18 |
| tipo | circular | circular | circular | circular | circular |
| Geométricos | | | | | |
| $H_e, \text{ t}$ | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| $P, \text{ t}$ | 140 | 550 | 250 | 350 | 450 |
| $Me, \frac{ts^2}{m}$ | 14.3 | 56.1 | 25.5 | 35.7 | 45.9 |

Tabla 15 Diseño de columnas con sismos intraplaca

| Intraplaca | | | | | |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nomenclatura | Inth11P140 | Inth9P550 | Inth7P250 | Inth5P350 | Inth3P450 |
| Resortes | | | | | |
| Kx, t | 23151 | 23817 | 23624 | 23412 | 22698 |
| $Kr, t\cdot m$ | 1048037 | 1073921 | 1066238 | 1058582 | 1029988 |
| $\bar{\zeta}_e$ | 0.088 | 0.066 | 0.062 | 0.074 | 0.128 |
| Datos de la columna | | | | | |
| D, m | 1.85 | 1.55 | 1.2 | 1.1 | 1 |
| r, m | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| dv, m | 50.8 | 50.8 | 38.1 | 31.75 | 31.75 |
| $Nvar$ | 14 | 14 | 10 | 12 | 10 |
| dvh, m | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| s_e, m | 0.25 | 0.18 | 0.28 | 0.22 | 0.18 |
| tipo | circular | circular | circular | circular | circular |
| Geométricos | | | | | |
| He, t | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| P, t | 140 | 550 | 250 | 350 | 450 |
| $Me, \frac{ts^2}{m}$ | 14.3 | 56.1 | 25.5 | 35.7 | 45.9 |

Tabla 16 Diseño de columnas con sismos corticales

| Cortical | | | | | |
|----------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| Nomenclatura | Corth11P140 | Corth9P550 | Corth7P250 | Corth5P350 | Corth3P450 |
| Resortes | | | | | |
| Kx, t | 23151 | 23853 | 23624 | 23805 | 22962 |
| $Kr, t\cdot m$ | 1048037 | 1075419 | 1066238 | 1073326 | 1040312 |
| $\bar{\zeta}_e$ | 0.088 | 0.063 | 0.062 | 0.056 | 0.104 |
| Datos de la columna | | | | | |
| D, m | 1.85 | 1.55 | 1.2 | 0.85 | 0.9 |
| r, m | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| dv, m | 50.8 | 41.275 | 31.75 | 31.75 | 25.4 |
| $Nvar$ | 13 | 14 | 15 | 8 | 13 |
| dvh, m | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| s_e, m | 0.2 | 0.22 | 0.28 | 0.28 | 0.14 |
| tipo | circular | circular | circular | circular | circular |
| Geométricos | | | | | |
| He, t | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| P, t | 140 | 550 | 250 | 350 | 450 |
| $Me, \frac{ts^2}{m}$ | 14.3 | 56.1 | 25.5 | 35.7 | 45.9 |

Mientras que en las figuras 60 a 64 se muestran los armados de las columnas analizadas por fuente sísmica. Como se podrá notar las columnas diseñadas con sismos corticales, tienen armados y dimensiones menores, también se puede observar que en términos generales las columnas diseñadas con sismos de subducción tienen mayor cuantía de acero de refuerzo longitudinal y transversal

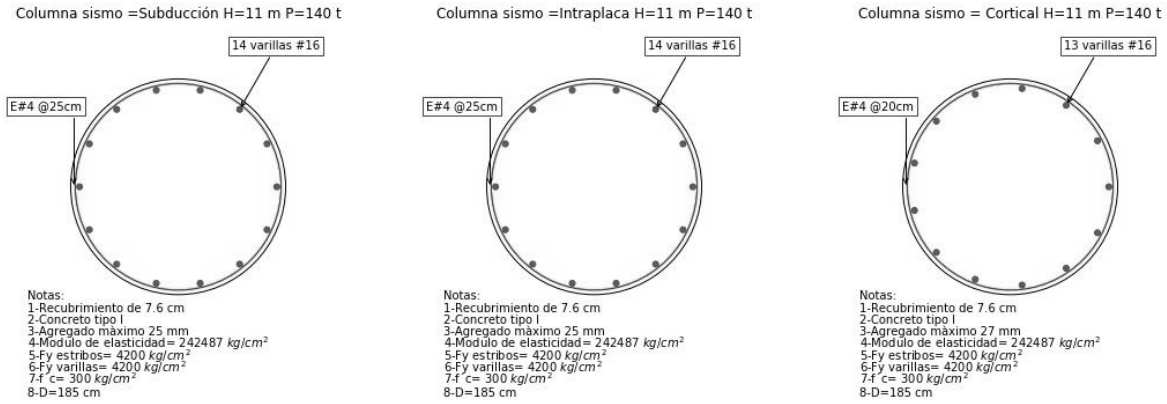


Fig. 60 Columna Subh11P140, Inth11P140 y Corth11P140 con altura de 11 m y carga de 140 t

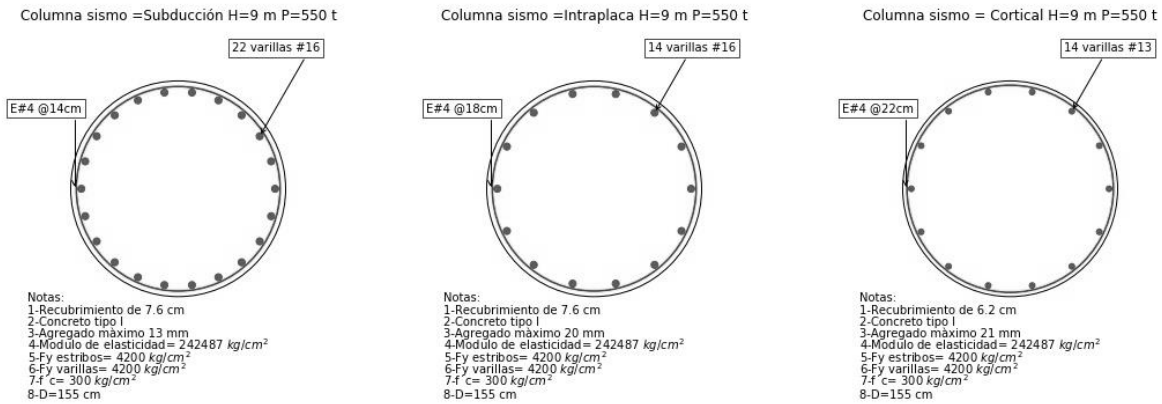


Fig. 61 Columna Subh9P550, Inth9P550 y Corth9P550 con altura de 9 m y carga de 550 t

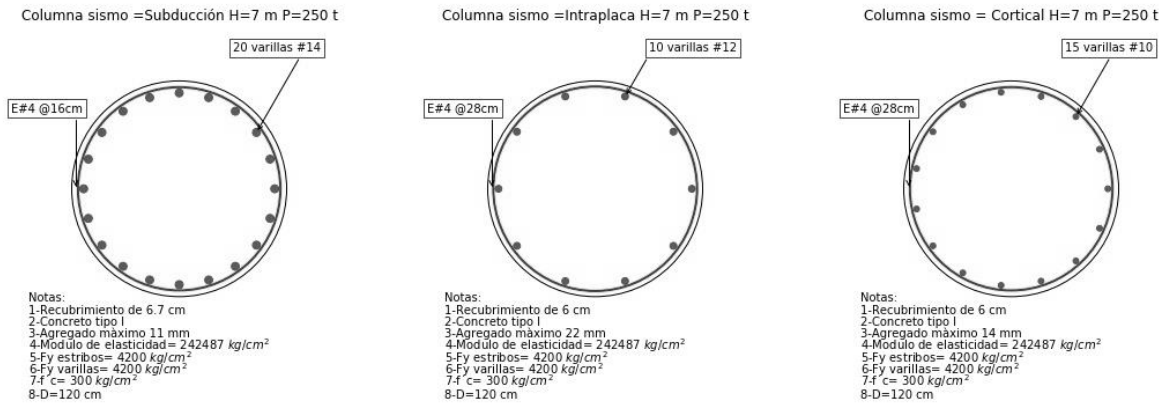


Fig. 62 Columna Subh7P250, Inth7P250 y Corth7P250 con altura de 7 m y carga de 250 t

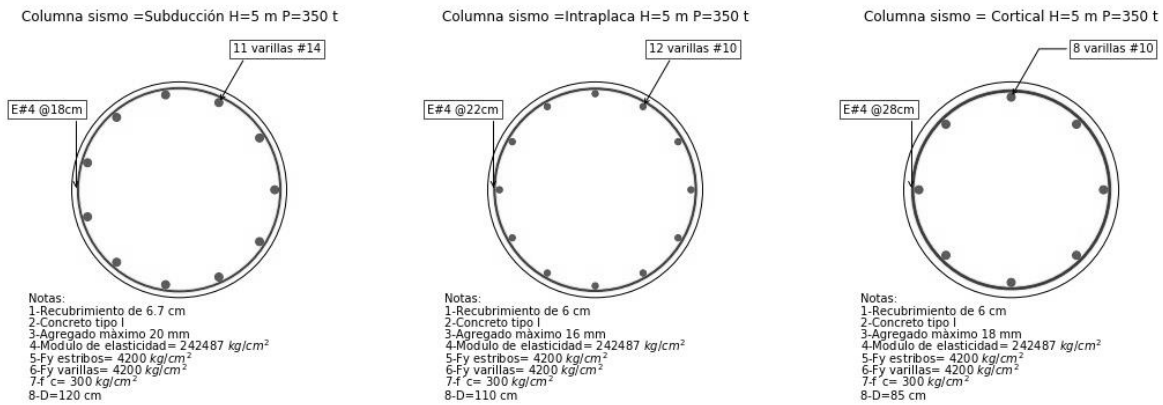


Fig. 63 Columna Subh5P350, Inth5P350 y Corth5P350 con altura de 5 m y carga de 350 t

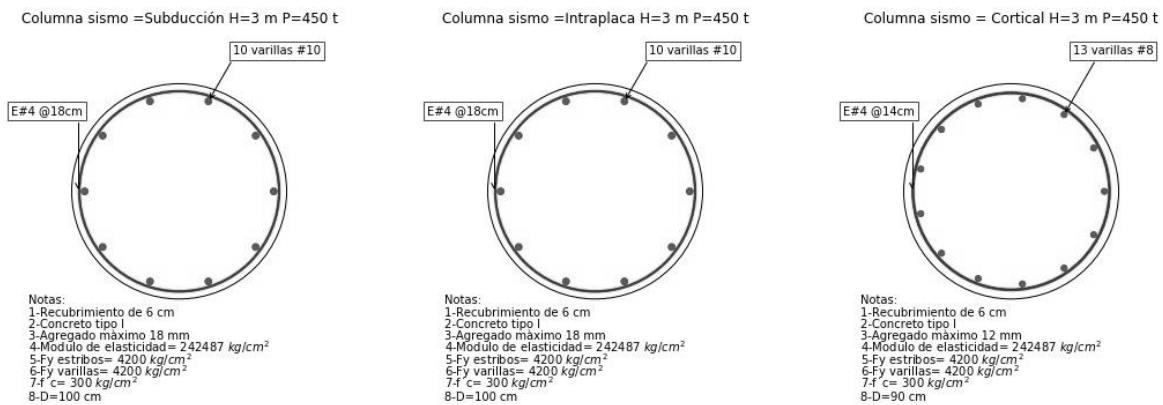


Fig. 64 Columna Subh3P450, Inth3P450 y Corth3P450 con altura de 3 m y carga de 450 t

4.6 Resultados

De los análisis realizados se obtuvieron los desplazamientos relativos de las columnas, así como algunos índices de desempeño, tales como: fluencia del acero de refuerzo longitudinal, aplastamiento del concreto no confinado y fractura del refuerzo longitudinal por tensión.

Índices de desempeño

Se revisaron 3 límites de desempeño en las fibras de la sección de concreto armado: la fluencia del acero con una deformación de 0.0021, el aplastamiento del concreto simple con una deformación del concreto de 0.004, y el fracturamiento del acero longitudinal con una deformación de 0.08, se ocupó este valor por ser el valor mínimo en el estudio de 475 varillas ensayadas (González *et al.*, 2004). Los índices de desempeño son los cocientes de la deformación crítica de las fibras de la sección entre el límite de desempeño. En las figuras 65 a 70 se presenta un ejemplo con la columna de 11 m, y una carga de 140 t; para sismos de supervivencia y de servicio; con interacción suelo-estructura (ISE) y empotrado (EM). En estas figuras se puede observar que las columnas con ISE tienen mejor comportamiento al tener índices menores a las columnas empotradas.

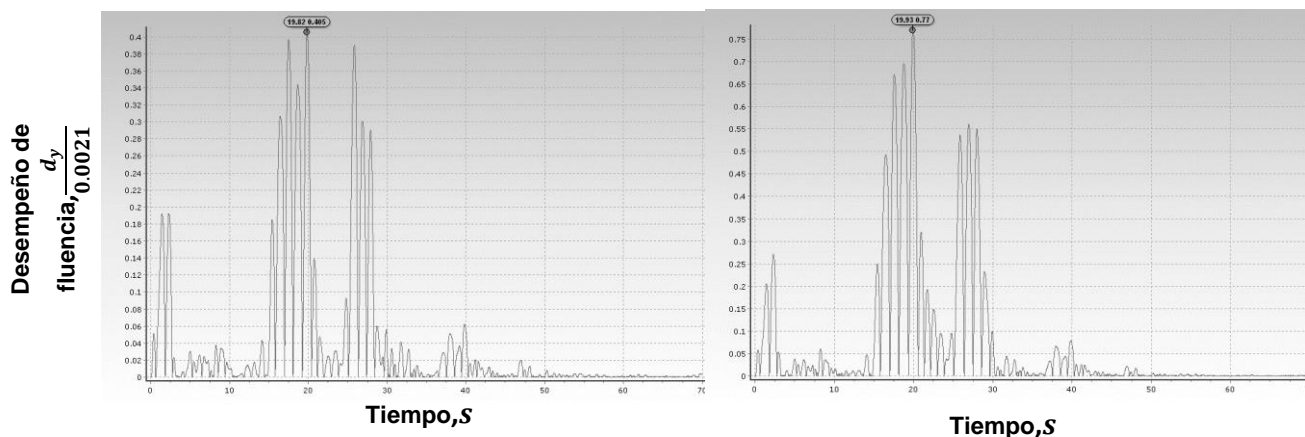


Fig. 65 Desempeño de fluencia para sismos de supervivencia ISE y EM

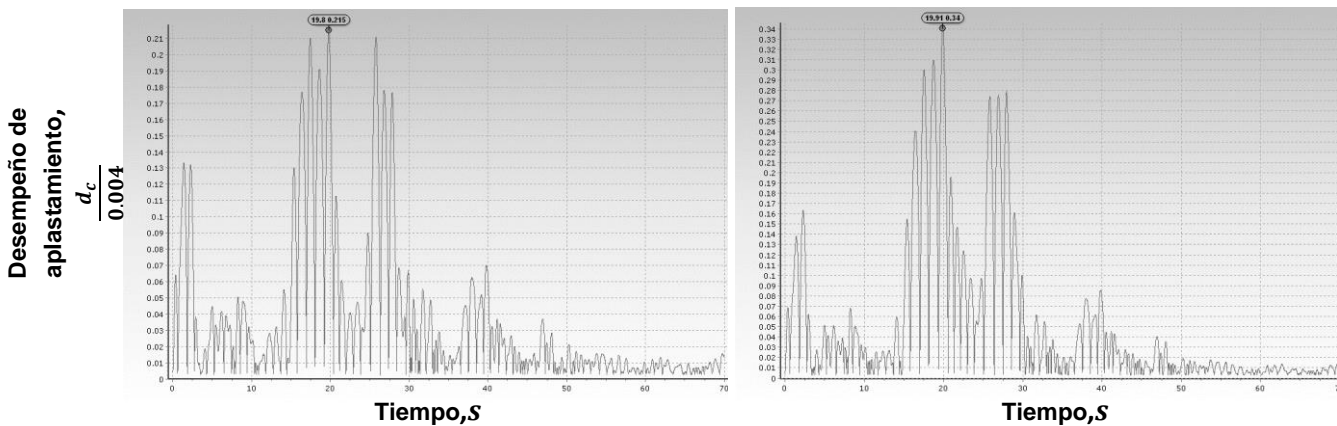


Fig. 66 Desempeño de aplastamiento de concreto para sismos de supervivencia ISE y EM

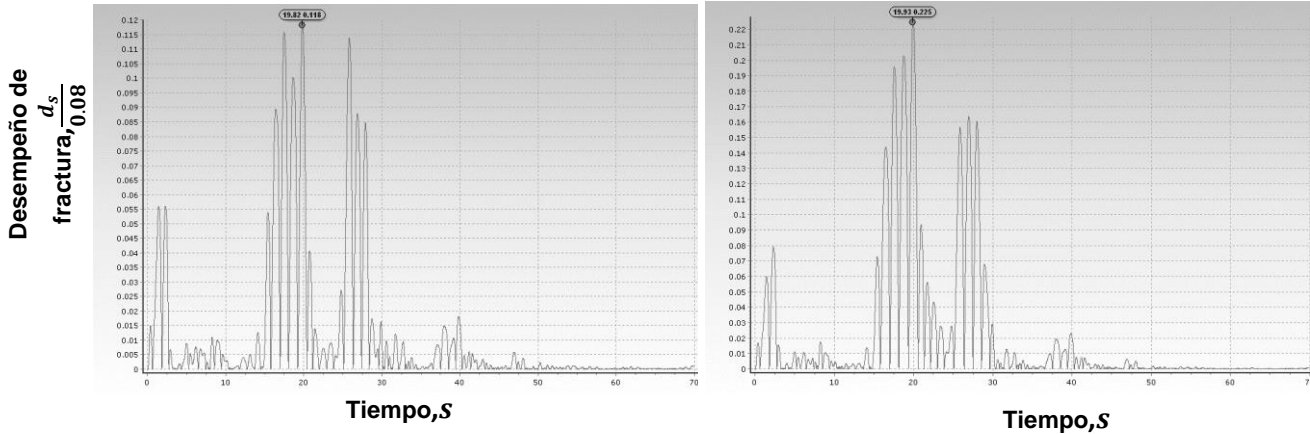


Fig. 67 Desempeño de fracturamiento de acero para sismos de supervivencia ISE y EM

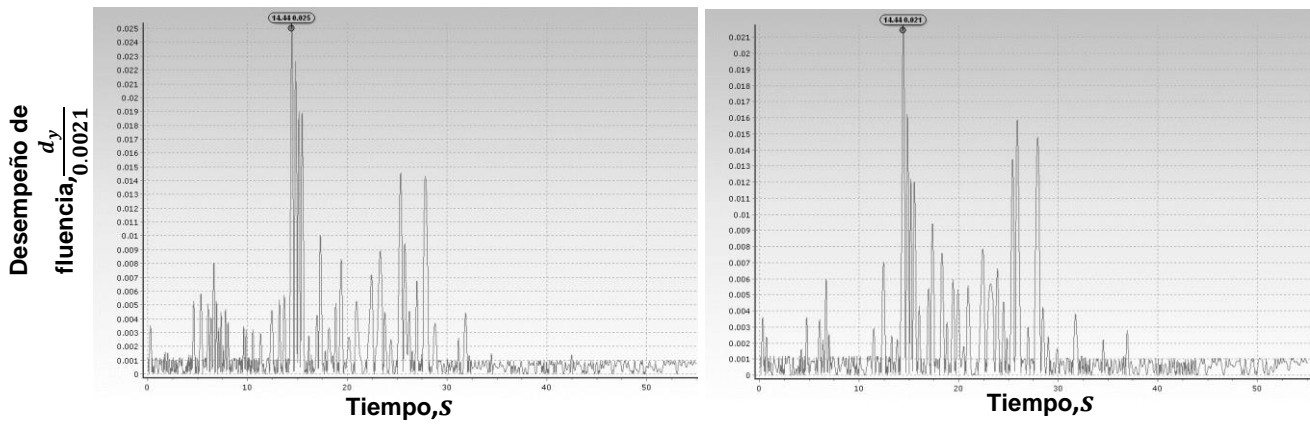


Fig. 68 Desempeño de fluencia para sismos de servicio ISE y EM

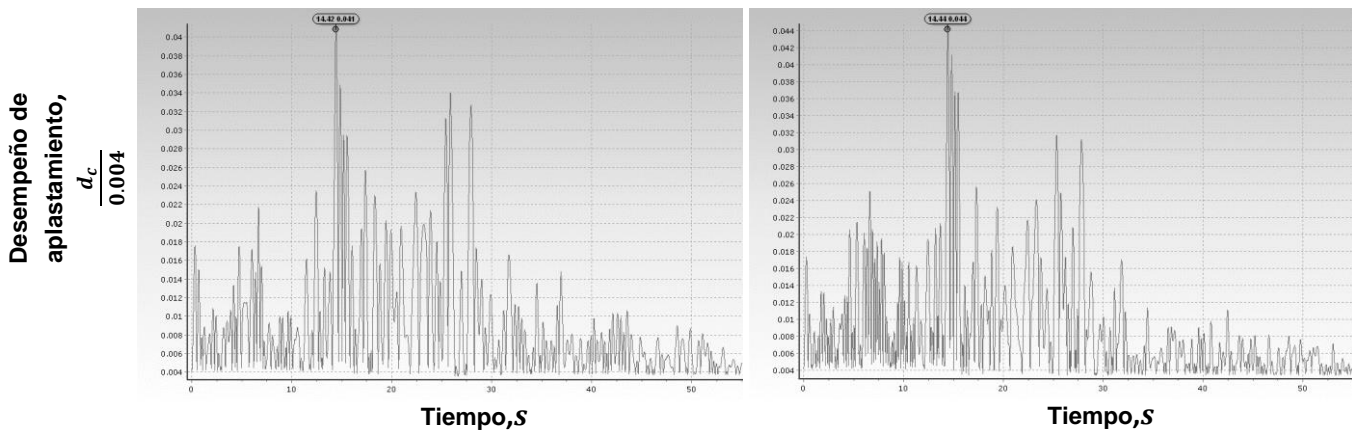


Fig. 69 Desempeño de aplastamiento de concreto para sismos de servicio ISE y EM

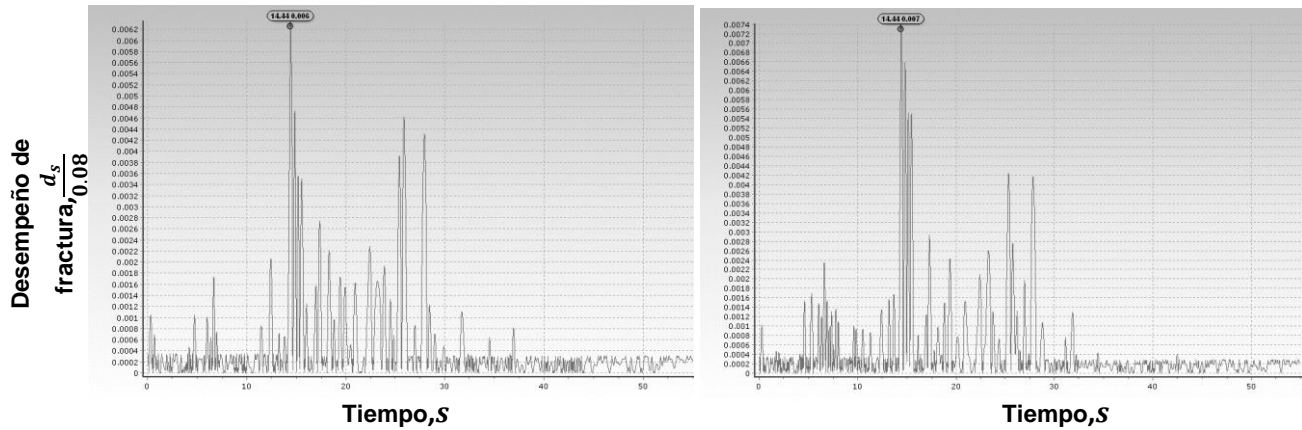


Fig. 70 Desempeño de fracturamiento de acero para sismos de servicio ISE y EM

Desplazamientos relativos

Se compararon los desplazamientos relativos de la columna con interacción suelo-estructura y empotrados para las cinco columnas analizadas restando el desplazamiento horizontal entre nodos y la deformación del giro. Se separaron por fuente sísmica y de estos resultados se puede observar que fallaron tres columnas, dos columnas empotradas y una columna con ISE, es decir alcanzaron la deformación necesaria para el fracturamiento del acero longitudinal. A continuación, se presentan las gráficas de la respuesta de desplazamientos (Fig. 71 a 85) y una tabla resumen (tabla 17 resumen) con los datos más importantes.

Análisis no lineal sismos de subducción

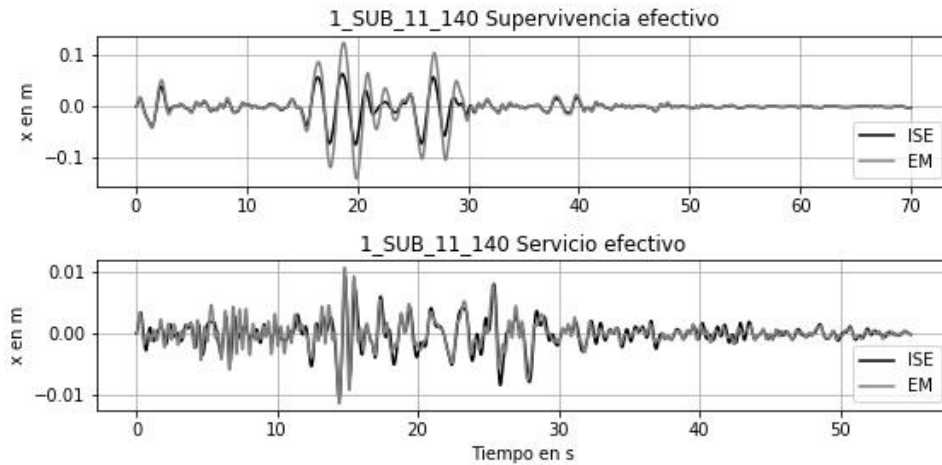


Fig. 71 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo de subducción

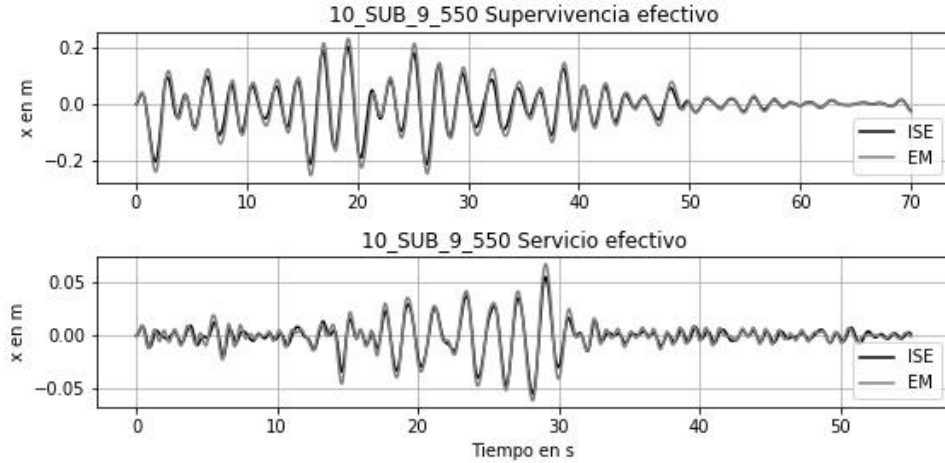


Fig. 72 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo de subducción

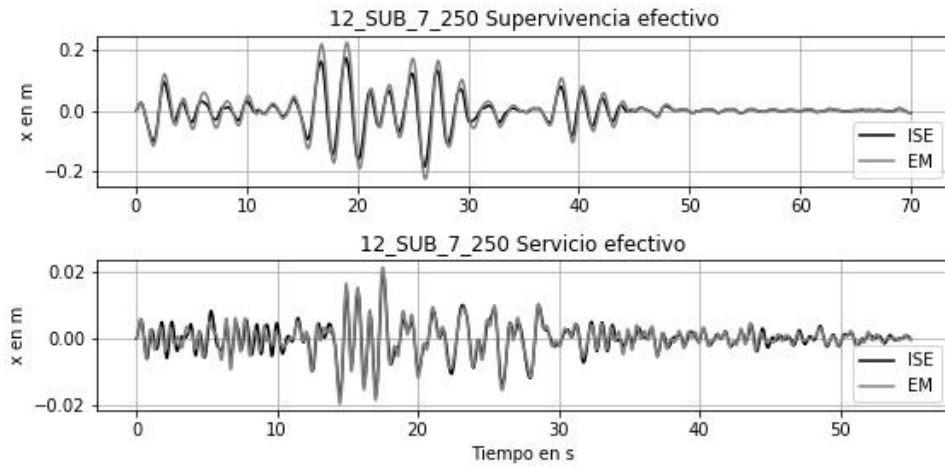


Fig. 73 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo de subducción

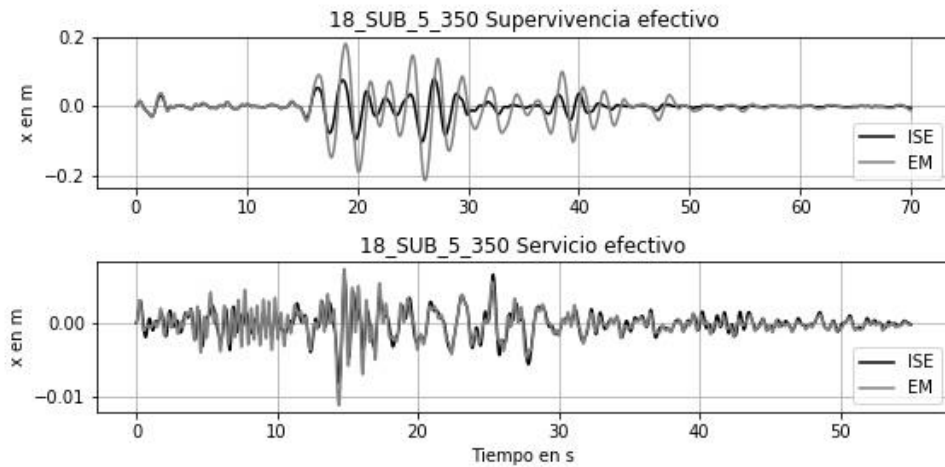


Fig. 74 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo de subducción

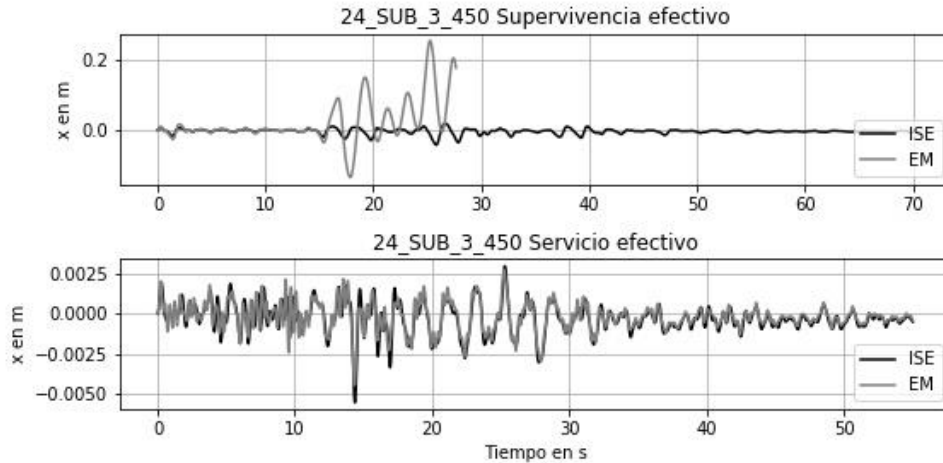


Fig. 75 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo de subducción

Análisis no lineal sismos intraplaca

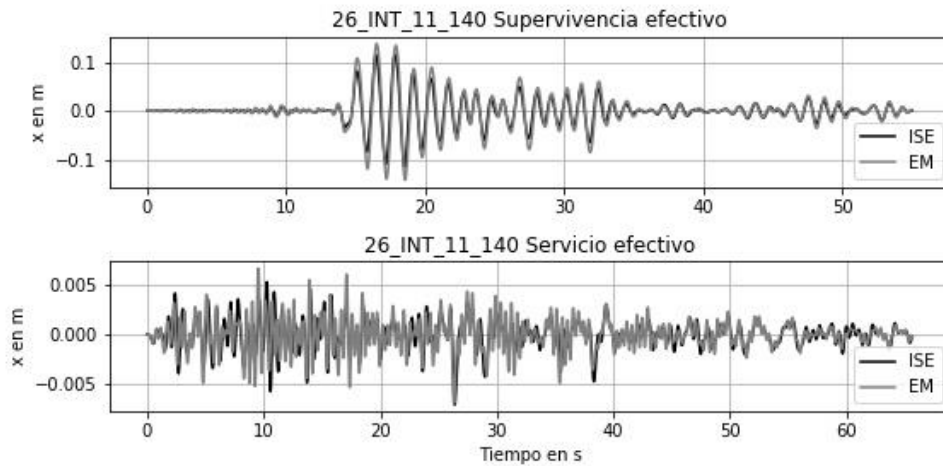


Fig. 76 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo intraplaca

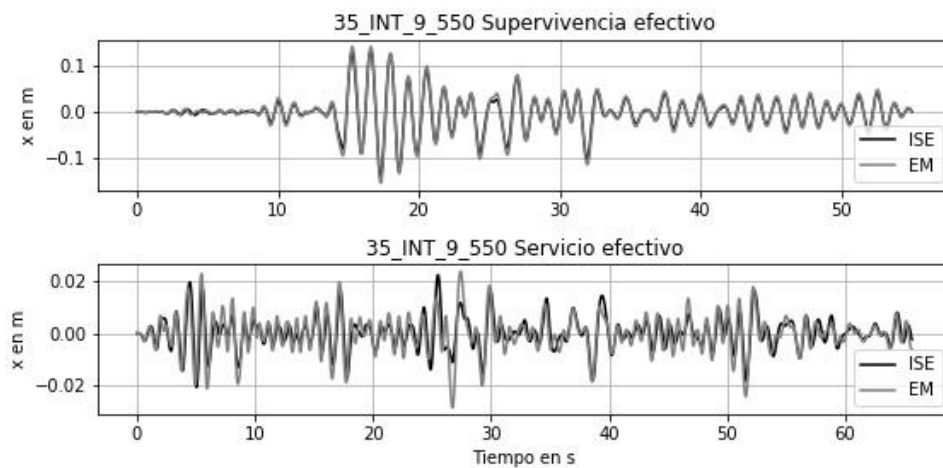


Fig. 77 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo intraplaca

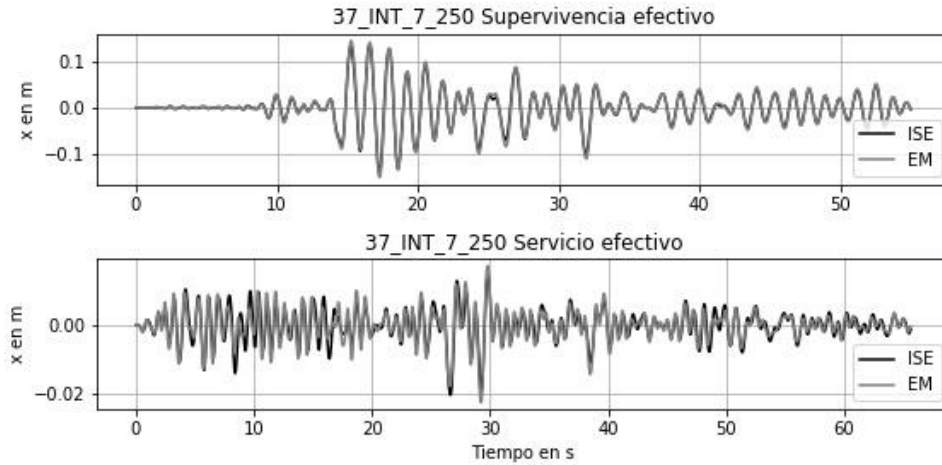


Fig. 78 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo intraplaca

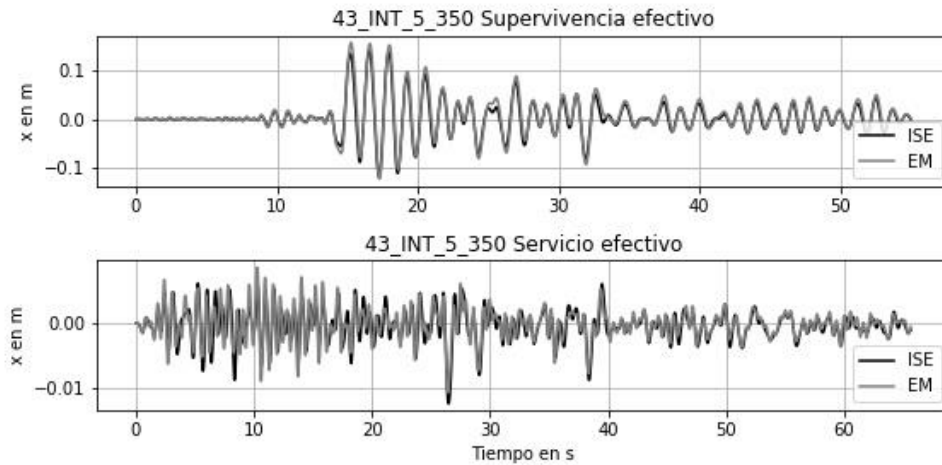


Fig. 79 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo intraplaca

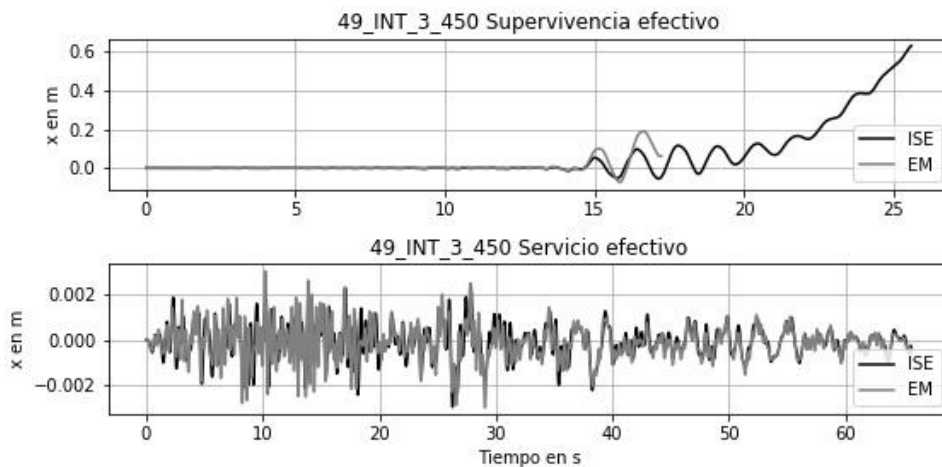


Fig. 80 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo intraplaca

Análisis no lineal sismos corticales

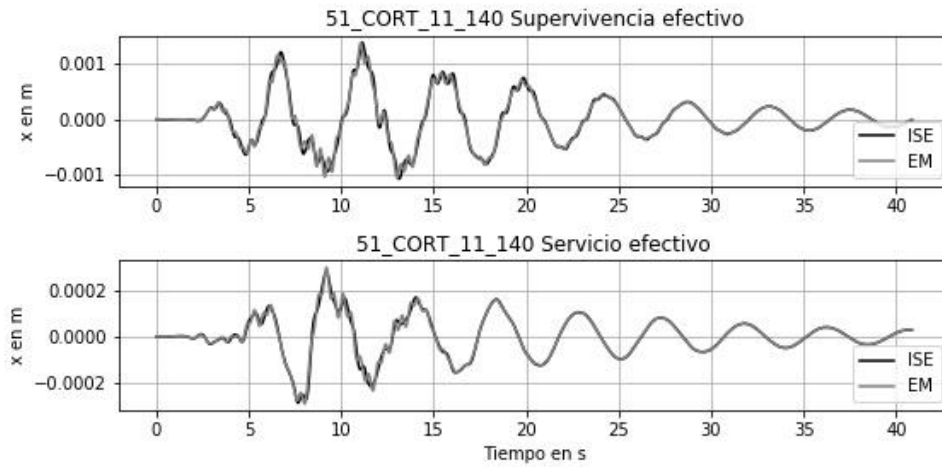


Fig. 81 Análisis no lineal de la columna con 11 m 140 t y sismo cortical

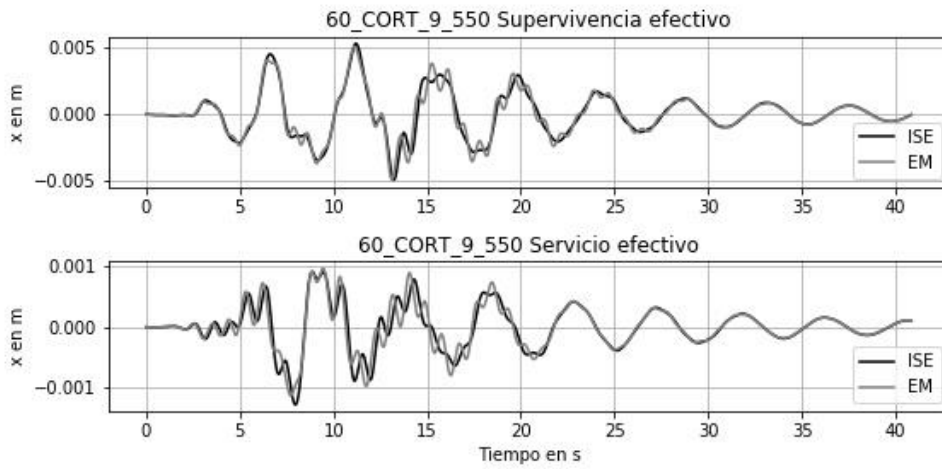


Fig. 82 Análisis no lineal de la columna con 9 m 550 t y sismo cortical

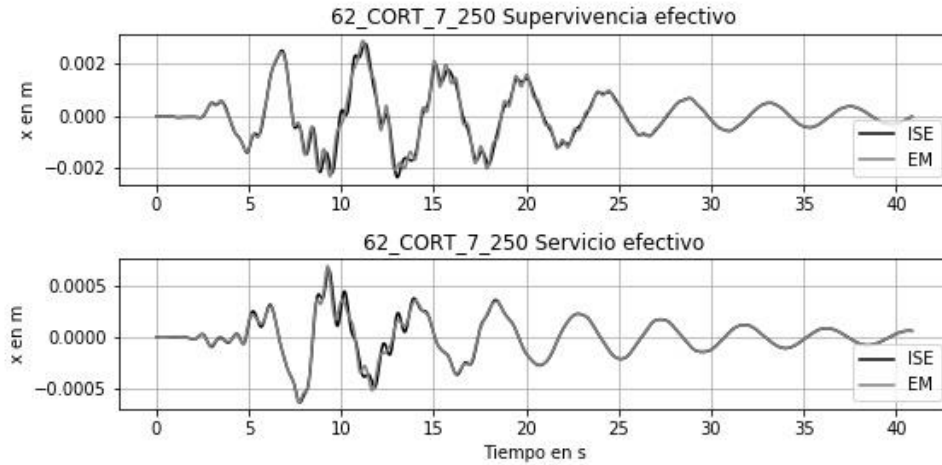


Fig. 83 Análisis no lineal de la columna con 7 m 250 t y sismo cortical

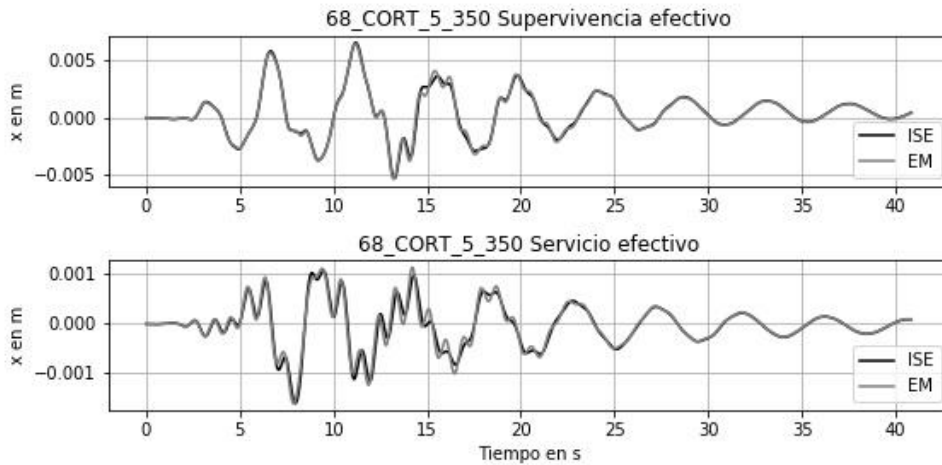


Fig. 84 Análisis no lineal de la columna con 5 m 350 t y sismo cortical

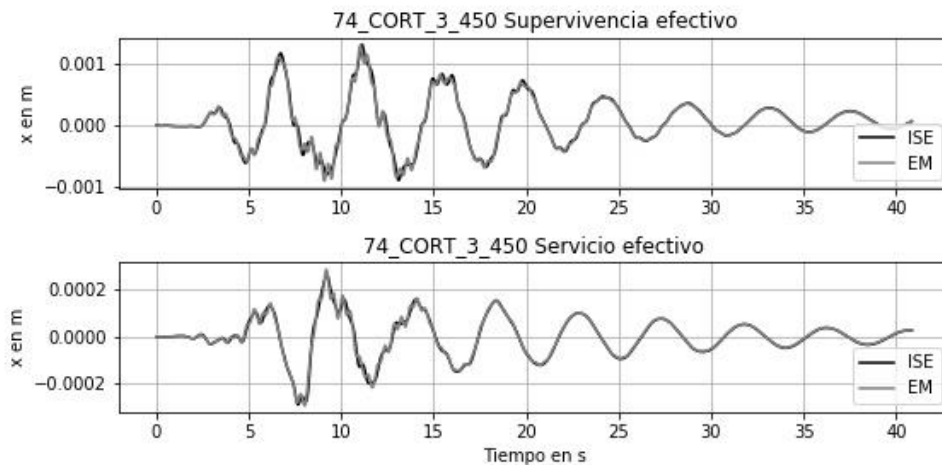


Fig. 85 Análisis no lineal de la columna con 3 m 450 t y sismo cortical

De las figuras 71 a 85 se puede observar que la respuesta efectiva pico es menor en la mayoría de los casos identificándose mejor en los sismos de supervivencia, inclusive la

columna de 3 m diseñada con un sismo de subducción con una carga de 450 t falló con un análisis empotrado y la respuesta mejoró tanto que con un análisis con ISE no falló. También se puede observar que la respuesta en los sismos corticales se mantuvo muy cercana en los dos casos.

A continuación, se presenta la tabla 17 que contiene un resumen de los criterios de desempeño obtenidos con los análisis no lineales. Los criterios de desempeño son los mismos que se describen anteriormente (índices de desempeño y desplazamientos máximos) se tomaron los valores máximos de los índices de desempeño en el tiempo durante el análisis no lineal, así como los desplazamientos máximos. El criterio de fluencia, aplastamiento de concreto y fractura de acero son cocientes esto quiere decir que si el valor es mayor a uno se llega al estado límite. De este resumen se obtiene información muy valiosa de los análisis, primero se puede observar que ninguna columna alcanza la fluencia en algunas de sus fibras con sismos de servicio; se puede apreciar que los índices de desempeño son menores en la mayoría de las columnas diseñadas con ISE; comparando los desplazamientos máximos con los desplazamientos efectivos se puede observar que muchos son similares, lo que quiere decir que la ISE no siempre beneficia el comportamiento de desplazamientos y por último se observa que falló una columna con ISE lo que se comentará con más detalle a continuación en las bondades del método de diseño.

Tabla 17 Criterios de desempeño de columnas

| Tipo de fuente | Tipo de análisis | Tipo de sismo | Criterios de desempeño | Columnas 11 m 140 t | Columnas 9 m 550 t | Columnas 7 m 250 t | Columnas 5 m 350 t | Columnas 3 m 450 t |
|----------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Subducción | Interacción suelo estructura | Supervivencia | Fluencia | 0.4050 | 1.3500 | 1.3300 | 1.6080 | 1.3110 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.2150 | 1.5590 | 1.2970 | 1.8800 | 2.5060 |
| | | | Fractura de acero | 0.1180 | 0.3940 | 0.3880 | 0.4690 | 0.3820 |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0770 | 0.2211 | 0.1864 | 0.1038 | 0.0422 |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.0743 | 0.2168 | 0.1848 | 0.1027 | 0.0418 |
| | | Servicio | Fluencia | 0.0210 | 0.2560 | 0.0820 | 0.0450 | 0.0610 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.0410 | 0.3340 | 0.1520 | 0.1310 | 0.2250 |
| | | | Fractura de acero | 0.0060 | 0.0750 | 0.0240 | 0.0130 | 0.0180 |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0126 | 0.0592 | 0.0208 | 0.0090 | 0.0060 |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.0107 | 0.0554 | 0.0197 | 0.0082 | 0.0056 |
| | Empotrado | Supervivencia | Fluencia | 0.7700 | 1.6200 | 1.6040 | 3.2920 | falla |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.3400 | 1.9030 | 1.6670 | 5.4850 | falla |
| | | | Fractura de acero | 0.2250 | 0.4700 | 0.4680 | 0.9600 | falla |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.1409 | 0.2555 | 0.2249 | 0.2154 | 0.2571 |
| Servicio | | Fluencia | 0.0250 | 0.3380 | 0.0930 | 0.0840 | 0.0390 | |

| Tipo de fuente | Tipo de análisis | Tipo de sismo | Criterios de desempeño | Columnas 11 m 140 t | Columnas 9 m 550 t | Columnas 7 m 250 t | Columnas 5 m 350 t | Columnas 3 m 450 t |
|----------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.0440 | 0.4040 | 0.1620 | 0.1770 | 0.1850 |
| | | | Fractura de acero | 0.0070 | 0.0990 | 0.0270 | 0.0240 | 0.0110 |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0115 | 0.0677 | 0.0212 | 0.0113 | 0.0045 |
| Intraplaca | Interacción suelo estructura | Supervivencia | Fluencia | 0.6330 | 0.8670 | 1.2050 | 2.1000 | 2.9550 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.3070 | 0.8230 | 0.9050 | 2.9000 | falla |
| | | | Fractura de acero | 0.1850 | 0.2530 | 0.3520 | 0.6000 | falla |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.1191 | 0.1444 | 0.1417 | 0.1400 | 0.6329 |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.1160 | 0.1406 | 0.1406 | 0.1392 | 0.6327 |
| | | Servicio | Fluencia | 0.0100 | 0.0580 | 0.0930 | 0.0780 | 0.0170 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.0280 | 0.1450 | 0.1540 | 0.1850 | 0.1360 |
| | | | Fractura de acero | 0.0030 | 0.0170 | 0.0270 | 0.0230 | 0.0050 |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0087 | 0.0251 | 0.0213 | 0.0132 | 0.0033 |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.0070 | 0.0222 | 0.0205 | 0.0125 | 0.0030 |
| | Empotrado | Supervivencia | Fluencia | 0.7590 | 0.9730 | 1.3020 | 2.3810 | 4.1700 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.3520 | 0.9110 | 0.9560 | 3.4550 | falla |
| | | | Fractura de acero | 0.2210 | 0.2840 | 0.3800 | 0.6940 | falla |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.1424 | 0.1541 | 0.1498 | 0.1562 | 0.1913 |
| | | Servicio | Fluencia | 0.0100 | 0.0910 | 0.1110 | 0.0590 | 0.0180 |
| Aplastamiento del concreto | | | 0.0280 | 0.1800 | 0.1680 | 0.1620 | 0.1450 | |
| Fractura de acero | | | 0.0030 | 0.0270 | 0.0320 | 0.0170 | 0.0050 | |
| Desplazamiento máximo, m | | | 0.0069 | 0.0283 | 0.0227 | 0.0108 | 0.0030 | |
| Corticales | Interacción suelo estructura | Supervivencia | Fluencia | 0.0012 | 0.0060 | 0.0042 | 0.0140 | 0.0144 |
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.0090 | 0.0450 | 0.0310 | 0.0970 | 0.0800 |
| | | | Fractura de acero | 0.0004 | 0.0017 | 0.0012 | 0.0042 | 0.0042 |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0019 | 0.0066 | 0.0031 | 0.0068 | 0.0014 |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.0014 | 0.0053 | 0.0028 | 0.0065 | 0.0013 |
| | | Servicio | Fluencia | 0.0012 | 0.0055 | 0.0042 | 0.0117 | 0.0140 |

| Tipo de fuente | Tipo de análisis | Tipo de sismo | Criterios de desempeño | Columnas 11 m 140 t | Columnas 9 m 550 t | Columnas 7 m 250 t | Columnas 5 m 350 t | Columnas 3 m 450 t | | |
|----------------|------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|--------|
| | | | Aplastamiento del concreto | 0.0053 | 0.0252 | 0.0184 | 0.0535 | 0.0540 | | |
| | | | Fractura de acero | 0.0003 | 0.0016 | 0.0042 | 0.0034 | 0.0039 | | |
| | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0004 | 0.0016 | 0.0007 | 0.0017 | 0.0003 | | |
| | | | Desplazamiento máximo efectivo, m | 0.0003 | 0.0013 | 0.0007 | 0.0016 | 0.0003 | | |
| | Empotrado | Supervivencia | | Fluencia | 0.0012 | 0.0056 | 0.0042 | 0.0144 | 0.0144 | |
| | | | | Aplastamiento del concreto | 0.0090 | 0.0434 | 0.0315 | 0.0960 | 0.0800 | |
| | | | | Fractura de acero | 0.0004 | 0.0017 | 0.0012 | 0.0042 | 0.0042 | |
| | | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0014 | 0.0051 | 0.0029 | 0.0064 | 0.0013 | |
| | | Servicio | | | Fluencia | 0.0012 | 0.0055 | 0.0042 | 0.0117 | 0.0136 |
| | | | | | Aplastamiento del concreto | 0.0053 | 0.0246 | 0.0186 | 0.0535 | 0.0540 |
| | | | | | Fractura de acero | 0.0003 | 0.0016 | 0.0012 | 0.0034 | 0.0039 |
| | | | | | Desplazamiento máximo, m | 0.0003 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0016 | 0.0003 |

En la figura 86 se presenta una gráfica en la que se puede ver que tanto mejora la respuesta del puente tomando en cuenta los efectos de ISE; para conocer esta respuesta se dividió la respuesta máxima relativa entre la base de la columna y la parte superior tomando en cuenta la ISE y tomando una base empotrada. Si el valor de ese cociente es la unidad significa que la respuesta máxima con ISE es igual a la respuesta empotrada, por lo tanto, si la respuesta es menor a la unidad la ISE beneficia la respuesta reduciendo los desplazamientos y si es mayor aumenta la respuesta.

Reflexionando sobre la figura 86 se puede apreciar que la respuesta de los sismos corticales es muy similar con ISE y empotrado, en los sismos de subducción en la mayoría la respuesta es menor a uno lo que significa que si se considera ISE la respuesta es menor en un caso siendo hasta 80% menor; para los sismos intraplaca la respuesta con ISE aumenta en dos casos con un máximo de tres veces pero en general la respuesta disminuye aunque no tanto como para la fuente de subducción; para la fuente intraplaca la respuesta que disminuye más es del orden de 20%.

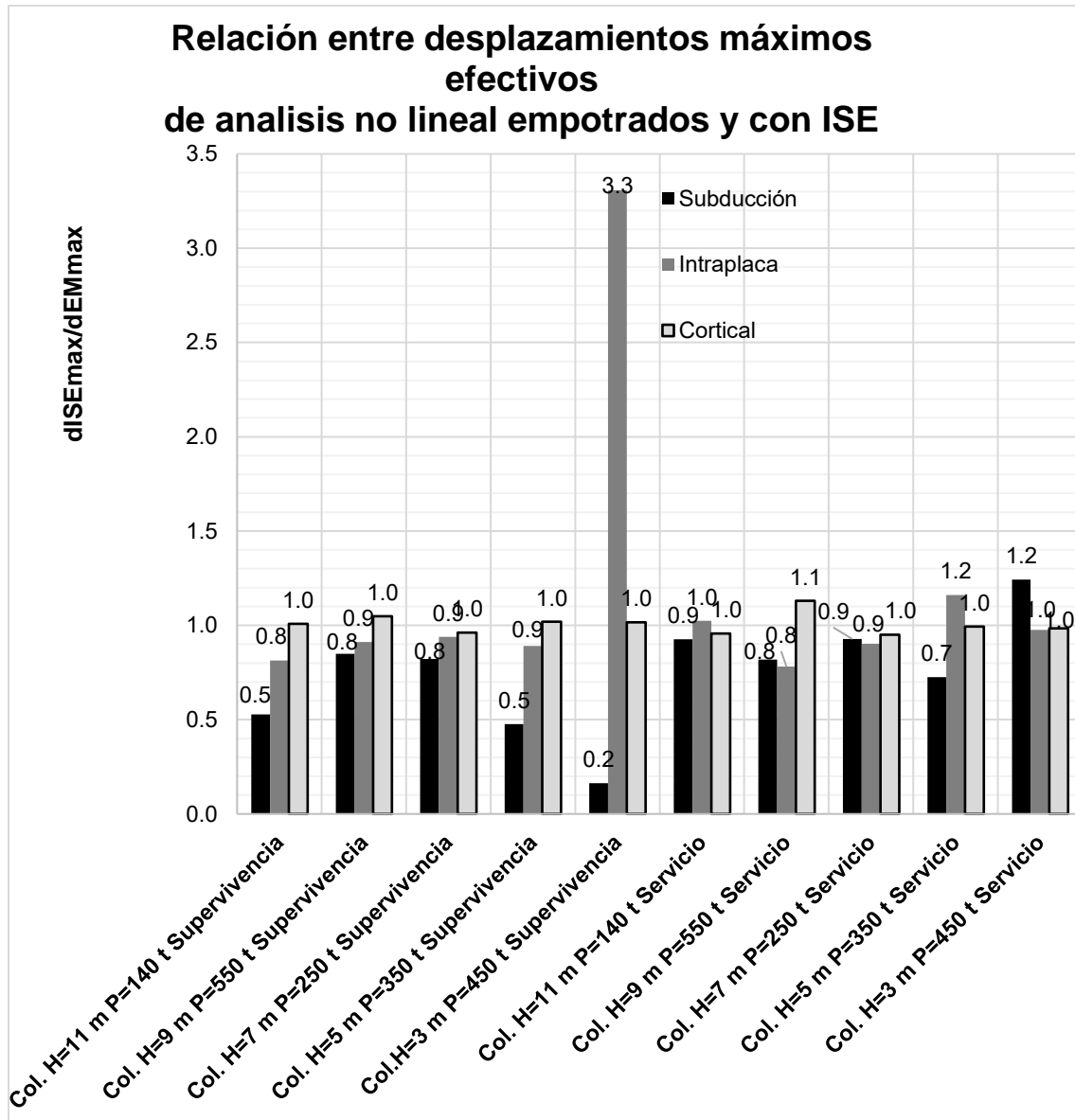


Fig. 86 Gráfica de barras con la relación entre desplazamientos máximos relativos del análisis no lineal con base empotrada y con ISE

4.7 Bondades del procedimiento de diseño sísmico

Primero se comparó el cortante actuante en el elemento con ISE del análisis no lineal paso a paso contra el estimado con el procedimiento del método de diseño y se puede observar que en todos los casos es menor excepto en la columna con $H = 3$ m y $P = 450$ t que tiene un valor de 1.3 mayor, en este caso el procedimiento sigue dando resultados confiables por el factor de importancia de 1.5 en el sismo de diseño. Los datos de la comparación de cortante se pueden ver en la tabla 18, y en la figura 87 se puede ver la comparación del cortante máximo en el estado límite de supervivencia con el análisis no lineal paso a paso contra el de diseño.

Tabla 18 Comparación de cortantes

| Cortante máximo (t) en el estado límite de supervivencia | | | | | | | |
|--|----------------|------|-----------|----------|--------|----------|----------------|
| Subducción | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 22.4 | 60.1 | 0.373 | 168% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 48.5 | 86.7 | 0.560 | 79% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 28.7 | 58.6 | 0.490 | 104% |
| 5 | 350 | 4.17 | 0.124 | 43.2 | 52.6 | 0.820 | 22% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 55.1 | 41.2 | 1.340 | -25% |
| Intraplaca | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 23.3 | 60.1 | 0.388 | 158% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 43.6 | 65.4 | 0.667 | 50% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 20.1 | 33.1 | 0.607 | 65% |
| 5 | 350 | 4.55 | 0.135 | 31.4 | 37.2 | 0.845 | 18% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 55.1 | 41.2 | 1.337 | -25% |
| Cortical | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 4.9 | 60.1 | 0.082 | 1126% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 16.5 | 53.9 | 0.305 | 228% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 6.7 | 33.1 | 0.203 | 393% |
| 5 | 350 | 5.88 | 0.175 | 10.0 | 23.9 | 0.419 | 138% |
| 3 | 450 | 3.33 | 0.212 | 12.3 | 49.7 | 0.248 | 303% |

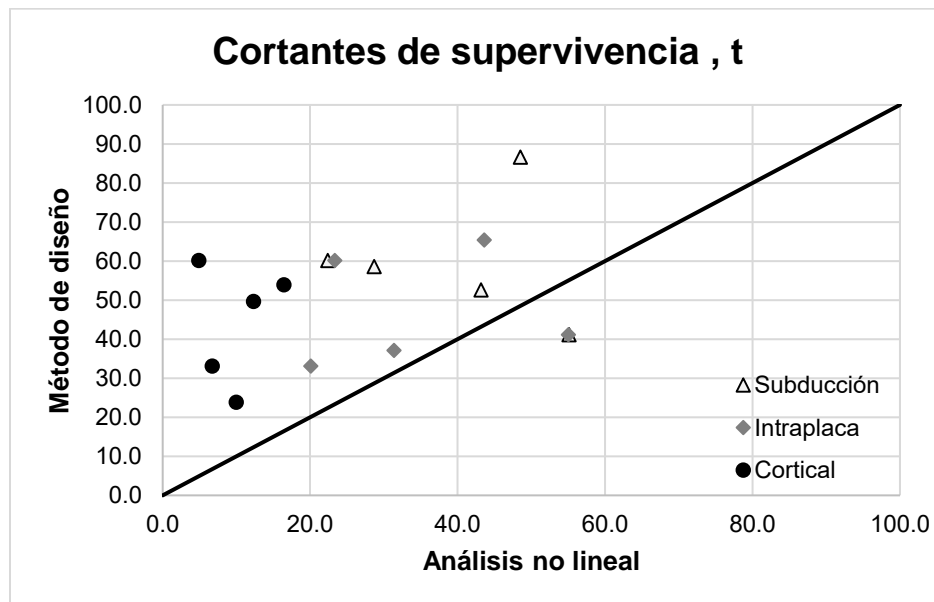


Fig. 87 Comparación de cortantes actuantes en el análisis no lineal y el método de diseño

En la tabla 19 se compararon los desplazamientos de supervivencia estimados con el método de diseño y con el análisis no lineal; se puede observar que los desplazamientos calculados con el método son menores en la mayoría de los casos, esto indica que se está diseñando con desplazamientos menores a los que se alcanzan en el método no lineal, aunque es importante destacar que los desplazamientos con el análisis no lineal no llegan a la falla. En la figura 88 se hace la comparación de los desplazamientos con los sismos de supervivencia contra el análisis paso a paso no lineal y los del método simplificado de diseño. Se puede observar que los datos siguen una tendencia lineal siendo mayores en el análisis no lineal; esto significa que se está subestimando la respuesta, lo cual es aceptable porque se revisó el estado límite de fractura, que solo en un caso se rebasó (sismo intraplaca columna H=3 m, P=140 t). Entonces que se estén alcanzando desplazamientos mayores en el análisis no lineal sin llegar a la falla significa que los elementos son capaces de soportar demandas de desplazamientos sísmicos mayores.

Tabla 19 Comparación de desplazamientos de supervivencia

| Desplazamiento de supervivencia (m) | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|------|-----------|----------|--------|----------|----------------|
| Subducción | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.0770 | 0.0496 | 1.553 | -36% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.2211 | 0.1312 | 1.685 | -41% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.1864 | 0.0622 | 2.998 | -67% |
| 5 | 350 | 4.17 | 0.124 | 0.1038 | 0.0471 | 2.205 | -55% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 0.0422 | 0.0300 | 1.409 | -29% |
| Intraplaca | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.1191 | 0.0504 | 2.363 | -58% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.1444 | 0.2554 | 0.565 | 77% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.1417 | 0.1476 | 0.960 | 4% |
| 5 | 350 | 4.55 | 0.135 | 0.1400 | 0.0741 | 1.889 | -47% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 0.6329 | 0.0388 | 16.326 | -94% |
| Cortical | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.0019 | 0.0040 | 0.488 | 105% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.0066 | 0.0168 | 0.392 | 155% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.0031 | 0.0093 | 0.334 | 199% |
| 5 | 350 | 5.88 | 0.175 | 0.0068 | 0.0139 | 0.487 | 105% |
| 3 | 450 | 3.33 | 0.212 | 0.0014 | 0.0025 | 0.575 | 74% |

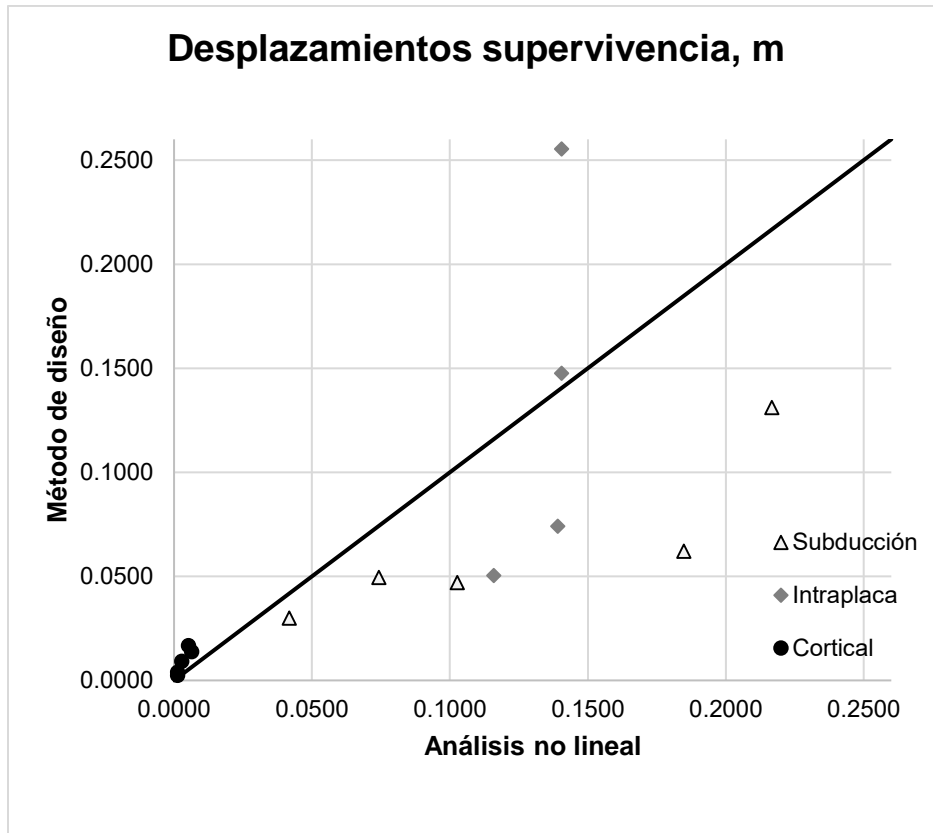


Fig. 88 Comparación de desplazamientos de supervivencia en el análisis no lineal y el método de diseño

En la tabla 20 se comparan los desplazamientos de servicio calculados con el análisis no lineal y con el método de diseño. Se observa que la mayoría de los desplazamientos esperados con el método de diseño son mayores, analizando estos resultados junto con el desempeño a la fluencia se observa un buen comportamiento ya que en este estado límite ninguna columna llega a la fluencia. En la Fig.89 se comparan los desplazamientos del análisis no lineal contra los calculados con el método, se puede ver que los datos están agrupados muy cerca de una línea con ajuste total, se puede concluir de esto que el método tiene una buena predicción y del lado de la seguridad porque se está diseñando con desplazamientos mayores que los que se requieren para alcanzar la fluencia.

Tabla 20 Comparación de desplazamientos de servicio

| Desplazamiento de servicio (m) | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|------|-----------|----------|--------|----------|----------------|
| Subducción | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.0126 | 0.0168 | 0.751 | 33% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.0592 | 0.0451 | 1.312 | -24% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.0208 | 0.0305 | 0.681 | 47% |
| 5 | 350 | 4.17 | 0.124 | 0.0090 | 0.0161 | 0.559 | 79% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 0.0060 | 0.0079 | 0.762 | 31% |

| Desplazamiento de servicio (m) | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|------|-----------|----------|--------|----------|----------------|
| Intraplaca | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.0087 | 0.0124 | 0.701 | 43% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.0251 | 0.0398 | 0.630 | 59% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.0213 | 0.0312 | 0.683 | 46% |
| 5 | 350 | 4.55 | 0.135 | 0.0132 | 0.0209 | 0.631 | 58% |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 0.0033 | 0.0060 | 0.546 | 83% |
| Cortical | | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente | Error relativo |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 0.0004 | 0.0007 | 0.577 | 73% |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 0.0016 | 0.0036 | 0.437 | 129% |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 0.0007 | 0.0020 | 0.381 | 163% |
| 5 | 350 | 5.88 | 0.175 | 0.0017 | 0.0038 | 0.443 | 126% |
| 3 | 450 | 3.33 | 0.212 | 0.0003 | 0.0006 | 0.543 | 84% |

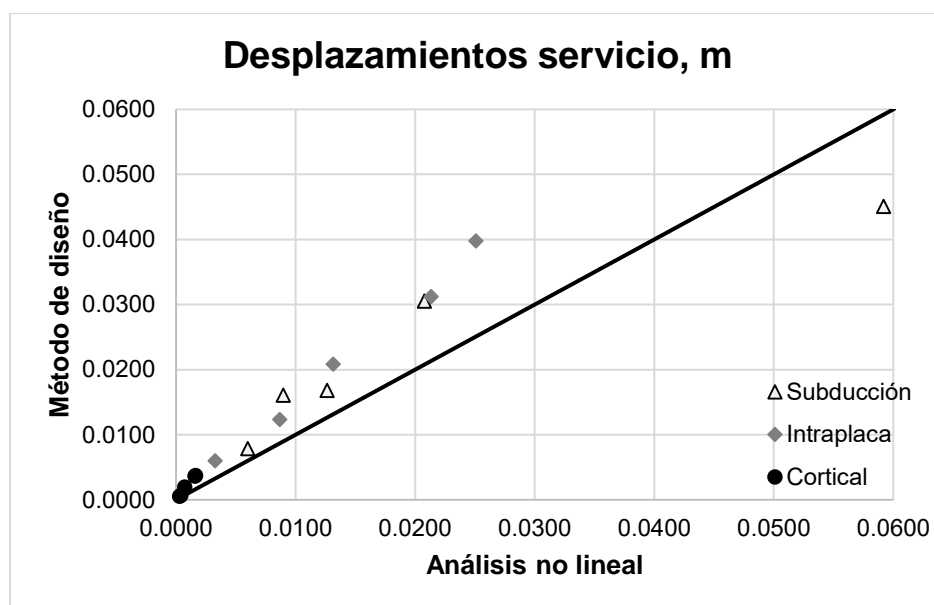


Fig. 89 Comparación de desplazamientos de servicio en el análisis no lineal y el método de diseño

En la tabla 21 se comparan los índices de desempeño para la fluencia en el caso del diseño se definió este índice como la siguiente razón $\frac{D_y}{D_{servicio}}$ y al índice del análisis se definió como la razón de la deformación a fluencia del acero entre la deformación máxima alcanzada por la fibra de refuerzo longitudinal. Este índice no se puede comparar directamente porque no se están comparando los mismos parámetros, pero demuestra de forma cualitativa el comportamiento que está teniendo. Comparando estos índices se puede observar que no se llega a la fluencia con los sismos de servicio demostrando un buen comportamiento del método. También se puede apreciar que, aunque haya valores muy

altos, en especial en los sismos corticales, no necesariamente indica que el método esté sobre diseñando las columnas porque es parte de las restricciones de la sección que se imponen al principio del método para garantizar un buen comportamiento y la confiabilidad según el método de diseño seleccionado y aun así la mayoría de las columnas tienen la cuantía de acero mínima que demandan las NTC-Concreto 2017, por lo que se comprueba que no están sobre diseñadas.

Tabla 21 Comparación de índice de desempeño de fluencia

| Comparación de índice de desempeño de fluencia | | | | | | |
|--|----------------|------|-----------|----------|--------|----------|
| Subducción | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 47.6 | 3.9 | 12.341 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 3.9 | 1.4 | 2.760 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 12.2 | 1.7 | 7.354 |
| 5 | 350 | 4.17 | 0.124 | 22.2 | 1.4 | 15.767 |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 16.4 | 1.1 | 14.463 |
| Intraplaca | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 100.0 | 5.2 | 19.051 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 17.2 | 1.4 | 12.075 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 10.8 | 1.3 | 8.283 |
| 5 | 350 | 4.55 | 0.135 | 12.8 | 1.1 | 11.847 |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 58.8 | 1.5 | 39.464 |
| Cortical | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | P/(A*f'c) | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 833.3 | 91.4 | 9.119 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 166.7 | 14.2 | 11.701 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 238.1 | 20.7 | 11.489 |
| 5 | 350 | 5.88 | 0.175 | 71.4 | 7.8 | 9.175 |
| 3 | 450 | 3.33 | 0.212 | 69.4 | 17.3 | 4.019 |

Por último, en la tabla 22 se comparó el índice de desempeño de fractura que se definió para el diseño como la siguiente razón $\frac{D_u}{D_{i_s}}$ y para el análisis se definió como la razón de la deformación a fractura del acero longitudinal del acero entre la deformación máxima alcanzada por la fibra de refuerzo longitudinal. Este índice de desempeño es muy importante porque cuando el valor es menor a la unidad se está concluyendo que la columna falló. Se puede ver en la tabla que una de las columnas falla y se debe a la relación de esbeltez que tiene, que es muy pequeña ($h/d=3$) y este método está pensado para relaciones comprendidas entre 3 y 6 por lo que se recomienda mantenerse en esos rangos para asegurar la confiabilidad del método. Observando las demás columnas se puede ver que las columnas diseñadas con sismos de subducción e intraplaca tienen valores bastante aceptables pensando que la unidad significa que la columna va a fallar, en los sismos corticales se puede ver que tienen valores demasiado altos de nuevo lo que significa que

la cuantía transversal que tienen es suficiente para tomar la demanda de desplazamientos del sismo de supervivencia; también se puede reflexionar que para estas columnas el diseño que está rigiendo para la cuantía transversal es el cortante y por último es importante destacar que la demanda de desplazamientos de este sismo no se obtuvo con acelerogramas reales y se podría estar subestimando la demanda de desplazamientos para esta fuente sísmica.

Tabla 22 Comparación de índice de desempeño de fractura

| Comparación de índice de desempeño de fractura | | | | | | |
|--|----------------|------|-------------------|----------|--------|----------|
| Subducción | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | $P/(A \cdot f'c)$ | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 8.5 | 10.5 | 0.804 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 2.5 | 3.6 | 0.705 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 2.6 | 6.5 | 0.397 |
| 5 | 350 | 4.17 | 0.124 | 2.1 | 5.3 | 0.402 |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | 2.6 | 4.8 | 0.548 |
| Intraplaca | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | $P/(A \cdot f'c)$ | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 5.4 | 10.4 | 0.521 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 4.0 | 1.4 | 2.869 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 2.8 | 1.6 | 1.759 |
| 5 | 350 | 4.55 | 0.135 | 1.7 | 2.2 | 0.759 |
| 3 | 450 | 3.00 | 0.191 | * | 3.7 | * |
| Cortical | | | | | | |
| Altura, m | Carga axial, t | h/D | $P/(A \cdot f'c)$ | Análisis | Diseño | Cociente |
| 11 | 140 | 5.95 | 0.032 | 2857.1 | 149.7 | 19.084 |
| 9 | 550 | 5.81 | 0.151 | 606.1 | 17.1 | 35.423 |
| 7 | 250 | 5.83 | 0.088 | 833.3 | 25.7 | 32.374 |
| 5 | 350 | 5.88 | 0.175 | 238.1 | 10.2 | 23.345 |
| 3 | 450 | 3.33 | 0.212 | 238.1 | 37.1 | 6.412 |

Notas: * el asterisco significa que esta columna tuvo una falla

V. CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación desarrollado se derivan las conclusiones que se describen a continuación:

- Con los análisis dinámicos (no lineales) paso a paso en las condiciones estudiadas en este trabajo se observó que tomar en cuenta la interacción suelo estructura en la mayoría de los casos resultó benéfico para la respuesta de la estructura, al tener una reducción de las demandas sísmicas, tanto en términos de cortante como de desplazamientos efectivos del elemento.
- Como observación se tiene que aclarar que cuando se diseña por desplazamiento tomando en cuenta los efectos de ISE, se debe ocupar el desplazamiento efectivo de la columna, para tomar en cuenta los efectos de rotación y desplazamientos de cuerpo rígido de la cimentación.
- También de estos análisis se observó, que no necesariamente las demandas de desplazamientos pueden resultar menores al considerar el efecto de ISE, ya que dependiendo de la fuente sísmica puede aumentar como en el caso de la columna diseñada con 3 m de altura y una carga axial de 450 t ante el sismo de servicio de subducción la respuesta aumento un 20%; también se ve que la respuesta puede mantenerse muy similar como en los sismos corticales.
- Los puentes diseñados con el método de diseño muestra buen comportamiento ya que de las columnas revisadas solo la columna de 3 m de altura tuvo algún tipo una falla por lo que se debe de hacer una revisión del método en relaciones de esbeltez de 3 y mayores a 6 para tomar en cuenta los efectos de segundo orden. El método se debe de ajustar para tener cuantías óptimas en la selección de las columnas y en el cálculo de las distorsiones últimas en relaciones de esbeltez menores a 3. El método resulta conservador en relación a los análisis no lineales pero con cuantías menores a métodos tradicionales.
- Como ya se había confirmado antes, la relación $(\frac{T_{e0}}{T_s} \frac{H_s}{H_{e0}} < 2.5)$ que proponen las NTC-sismo (2017) como condición para tomar en cuenta los efectos de ISE inerciales es efectiva porque en el análisis de sensibilidad de la rigidez relativa ($R_R = \frac{H_e T_s}{H_s T_e}$) para relaciones menores a 0.4 (esto es igual al 2.5 de las normas) el aumento en el periodo efectivo del sistema es menor al 5%.
- De comparar los efectos de ISE contra el diseño con base empotrada se observa que las columnas diseñadas con fuente sísmica de subducción e intraplaca requieren menor refuerzo transversal, en los sismos de fuente cortical permanecen con el mismo refuerzo que los diseños con base empotrada, también se observa en los análisis dinámicos que la respuesta es muy similar para esta fuente sísmica.

También se observa que la cuantía longitudinal se encuentra dentro de la mínima para la sección según las NTC-concreto (2017) y la cuantía transversal es menor en la mayoría de los casos a las que se requerirían si se diseñará con el reglamento AASTHO.

- De comparar el efecto de las fuentes sísmicas en el diseño se observa que en los sismos de subducción e intraplaca lo que más afecta es el contenido de frecuencias ya que tienen intensidades similares y en los sismos corticales además de esto la intensidad.
- Sobre la demanda de desplazamientos por fuente sísmica se muestra la Fig.90, donde se pueden ver los espectros de respuesta de desplazamientos para las tres fuentes sísmicas, para los sismos de supervivencia ocupados en los análisis. Estos espectros tienen una relación de amortiguamiento crítico de 5% con una ductilidad de uno. Las columnas de puentes diseñadas tienen unos periodos comprendidos entre 0.57 s y 1.47 s; con esto se puede concluir que la ISE, al alargar el periodo efectivo de la estructura, puede hacer que aumente la demanda de desplazamientos; por eso también es importante el aumento del amortiguamiento efectivo. Si se comparan las tres fuentes sísmicas para los periodos comprendidos de los diseños, la fuente sísmica que puede aumentar más la demanda de desplazamientos es la de los sismos intraplaca y después los de subducción; los corticales no generaron demandas de desplazamientos tan grandes.

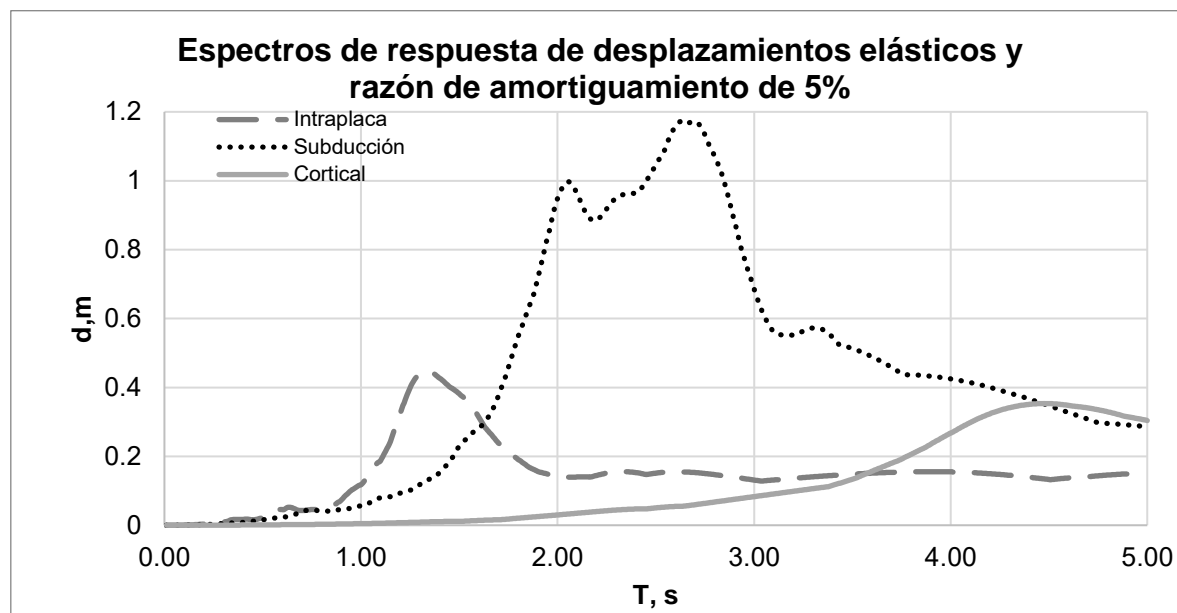


Fig. 90 Espectros de respuesta de desplazamientos

- En las columnas diseñadas con sismos corticales la mayoría de las columnas tienen un aumento del periodo efectivo en relación con periodo empotrado de 1-1.03, para los sismos de subducción 1.09-1.12 y para sismos intraplaca 1.12-1.15 lo que significa que las columnas con mayores alargamientos del periodo son las columnas diseñadas con sismos intraplaca después las diseñadas con sismos de subducción y por último las diseñadas con sismos corticales. Esto se puede ver en el histograma de la figura 91 que representa el siguiente cociente $\frac{T_e}{T_{cr}}$

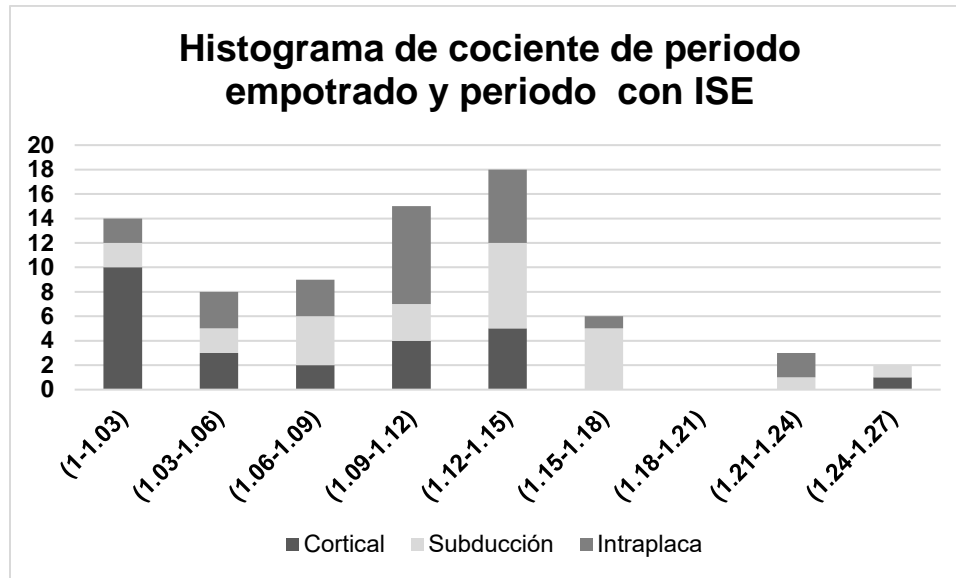


Fig. 91 Histograma de cociente de periodo empotrado y periodo con ISE ($\frac{T_e}{T_{cr}}$)

- Como recomendación es muy importante definir los sismos representativos para el servicio y para la supervivencia ya que pueden cambiar drásticamente los diseños de las columnas como se observa con los sismos corticales que tienen una demanda pequeña en comparación a las otras dos fuentes sísmicas analizadas.

VI. REFERENCIAS

- AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.,.
- Aguayo, J. E., & Trápaga, R. (1996). *Geodinámica de México y minerales del Mar* (Primera edición ed.). México: Fondo.
- Aguilar Becerril, H. R. (2010). *Efectos de grupo de pilotes en la respuesta de estructuras*. Tesis doctoral, UNAM, Facultad de ingeniería, México D.F.
- Aguilar, H., & Aviles, J. (2003). Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo-estructura. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 19, 3-18.
- Avalos, A. (20 de Septiembre de 2017). *viveusa.mx*. Obtenido de <https://www.viveusa.mx/articulo/2017/09/20/educacion/el-terremoto-mas-costoso-en-la-historia-de-eu><https://www.viveusa.mx/articulo/2017/09/20/educacion/el-terremoto-mas-costoso-en-la-historia-de-eu>
- Aviles, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámicas suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica* (71), 1-36.
- Aviles, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2011). Use of global ductility for design of structure-foundation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1018-1026.
- Bazán, E., & Meli, R. (2004). *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.
- Botero, P. C. (2000). *Efectos de interacción-suelo estructura considerrando la flexibilidad del suelo y el desprendimiento parcial de la cimentación*. Tesis Doctoral, UNAM, División de estudios de posgrado Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CDMX.
- Botero, P., J. C., Jaramillo, J. D., & Rochel Awad, R. (2004). Evaluación de los efectos inerciales de interacción dinámica suelo-estructura para edificios ubicados en Medellín. *Revista Universidad EAFIT*, 40(134), 90-104.
- CFE. (2015). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*. México: Comisión Federal de Electricidad.
- Cid Villegas, G. (2015). *Aplicación de sistemas de información geográfica en la documentación de fallas cuaternarias en México*. Juriquilla: Tesis UNAM.

- Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Corona, E. R., & Benavides, M. M. (2012). *Principales efectos causados por el sismo del 20 de marzo de 2012 en la costa de los estados de Guerrero y Oaxaca, Mexico*. México.
- COVITUR. (1987). *Manual de diseño geotécnico*. Manual, Gobierno del Distrito Federal, Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, México D.F.
- Crouse, C., & McGuire, J. (2001). Energy Dissipation in Soil-Structure Interaction. *Earthquake Spectra*, 17(2), 235-259.
- Dobry, R., & Gazetas, G. (1988). Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups. *Geotechnique*, 557-574.
- Fernandez, O. A. (2014). *Análisis geotécnico de respuesta dinámica*. Tesis Maestría, UNAM, Geotécnia, México, D.F.
- Fernandez-Sola, L., & Huerta-Écatl, J. (2018). Inelástico behavior of systems with flexible base. *Earthquakes and Structures*.
- Finley, A. C. (2008). Unintended Consequences of Modeling Damping in Structures. *J. Struct Eng.*, 581-592.
- Flores, L. O. (2007). *Caracterización de parametros sísmicos en el lago de Texcoco*. Tesis de Maestría, UNAM, México D.F.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo* (Vols. Tomo II, No. 220-bis). Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2018). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing un Science & Engineering*, 9(3), 90-95.
- Kokusho, T., Yoshida, & Esashi. (1982). *Dynamic Properties of Soft Clay for Mid Strain Range*. EUA.
- Kostoglodov, V., & Pacheco, J. F. (1999). *usuarios.geofisica.unam.mx*. Obtenido de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
- Libertad Bajo Palabra. (Septiembre de 2017). *LibertadBajoPalabra.com*. Obtenido de <https://libertadbajopalabra.com/2017/09/23/tras-los-sismos-la-manana-del-sabado-nada-lamentar-veracruz-chiapas-colapso-puente-ixtaltepec/>
- NAKAMURA, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of NAKAMURAS' technique and its applications. *12WCEE*. New Zeland.

- Oller, S., Barbat, A., & Soberón, G. (2000). *Vulnerabilidad de puentes de autopista. Un estado del arte*. Barcelona: Centro Internacional de métodos numéricos en ingeniería.
- Ordaz, M., & Pérez-Rocha, L. E. (1998). Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: a new approach. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 889-901.
- Ordaz, M., Castellanos, F., & Zapata, A. (2002). *Manual de uso del programa DEGTRA A4*. México.
- Organización Panamericana de la Salud. (2010). *El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile Crónica y lecciones aprendidas en el sector salud*. Santiago de Chile: AIRENA.
- Priestley, M. J. (2000). Performed based seismic design. *12th WORLD Conference on Earthquake Engineering*. New Zeland.
- Priestley, M., Calvi, G. i., & Kowalsky, M. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS PRESS: Pavia, Italia.
- Rascón, O., Chavez, M., & Flores, R. (1976). Corrección de las líneas base de registros de temblores. *Revista de Ingeniería sísmica*.
- Rascón, O., Chavez, M., Alonso, L., & Palencia, V. (1976). Corrección de las líneas base de registros de temblores. *Revista de Ingeniería sísmica*.
- Rivera, V. D. (2005). *Diseño sísmico de columnas de puentes urbanos de concreto reforzado en la Ciudad de México*. Tesis doctoral, UNAM, Ciudad Universitaria.
- Rivera, V. D. (2007). *Evaluación simplificada de la vulnerabilidad sísmica de puentes urbanos*. CENAPRED, Subdirección de estructuras y geotecnia . Ciudad de México: CENAPRED.
- Rivera, V. D., & Sánchez, F. R. (2018). Evaluación de tasas de excedencia y espectros de peligro uniforme. En V. D. Rivera, *Estudios para el análisis del riesgo sísmico en Naucalpan* (págs. 21-35). Naucalpan: UNAM FES Acatlán.
- Rivera, V. D., Rodríguez, A. J., & Hernández, B. H. (2017). Diseño sísmico de puentes basado en desplazamientos con efectos de interacción suelo-estructura. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Guadalajara Jalisco.
- Rivera, V. D., Terron, H. J., & Arce, L. C. (2014). Estimación de la rigidez agrietada para el análisis sísmico en estructuras de concreto reforzado. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*.
- Romo, P. M. (1995). Clay Behaviour, Ground Response and Soil-Structure Interaction Studies in Mexico City. *Proceedings: Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics*, (págs. 1039-1051). Missouri.
- Salguero, M. (26 de Septiembre de 2017). *Serendipia.digital*. Obtenido de <https://serendipia.digital/2017/09/a-una-semana-del-sismo-explicaciones-recuentos-y-esperanza/>
- SEAOC. (1995). *Vision 2000 Report on performance based seismic engineering of buildings*. Sacramento: Structural Engineers Association of California.

Seed, B. H., & Idris, M. I. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Earthquake Engineering Research Center*.

SeismoStruct. (2018). *Verification Report*. Pavia, Italy.

Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *sgm.gob.mx*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html>

Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *www.sgm.gob.mx*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>

Sistema de Transporte Colectivo. (12 de Marzo de 2008). *Metro CDMX*. Obtenido de <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/material-rodante>

Solis, Y. L. (2017). *Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago de Texcoco*. Tesis de Maestría, UNAM, Departamento de Geotecnia, Ciudad de México.

Wikipedia. (septiembre de 2018). *www.wikipwdia.com*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_de_la_Ciudad_de_M%C3%A9xico

Anexo 1 Clasificación de registros

| Sismos corticales | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| MIHL0910 | 29/10/2009 | 4.8 | M=5.5 | -3.28 | 3.27 | 1.46 | 173 | Blando | 21 | 13 |
| MIHL1501 | 18/01/2015 | 0.6 | M=4 | -3.77 | -3.03 | 6.49 | 29 | Blando | 21 | 24 |
| MIHL1503 | 18/03/2015 | 3 | M=4.4 | -3.68 | -3.65 | 4.97 | 30 | Blando | 21 | 13 |
| OAXM0910 | 29/10/2009 | 0.2 | M=5.5 | -6.33 | 5.50 | 3.72 | 225 | Aluvial | 1594 | 13 |
| OXAE0910 | 29/10/2009 | 0.7 | M=5.5 | -4.40 | 3.87 | 2.16 | 233 | Blando | 1524 | 13 |
| OXAL0910 | 29/10/2009 | 0.15 | M=5.5 | 3.21 | 3.43 | -2.20 | 227 | Blando | 1554 | 13 |
| OXCU0910 | 29/10/2009 | 0.5 | M=5.5 | 4.82 | 4.35 | 2.43 | 228 | Arcillas | 1539 | 13 |
| OXPM0910 | 29/10/2009 | 6 | M=5.5 | -3.63 | -5.41 | -2.18 | 227 | Blando | 1550 | 13 |
| OXTO0910 | 29/10/2009 | 0.6 | M=5.5 | -5.15 | 5.47 | 3.04 | 226 | Aluvial | 1553 | 13 |
| OXTO1601 | 30/01/2016 | 0.6 | M=4.6 | 1.11 | -1.10 | 1.57 | 210 | Aluvial | 1553 | 10 |
| OZST0910 | 29/10/2009 | 7 | M=5.5 | -15.48 | -11.59 | 8.07 | 143 | Blando | 1244 | 13 |
| OZST1606 | 11/06/2016 | 0.9 | M=3.9 | 4.06 | 3.90 | -2.54 | 11 | Blando | 1244 | 12 |
| PIJI0910 | 29/10/2009 | 0.29 | M=5.5 | -2.20 | 1.60 | 0.66 | 458 | Blando | 56 | 13 |
| SODO0910 | 29/10/2009 | 10 | M=5.5 | -4.87 | -4.68 | -5.35 | 69 | Aluvial | 101 | 13 |
| SODO1105 | 20/05/2011 | 7 | M=3.7 | -2.00 | 1.64 | 3.32 | 43 | Aluvial | 101 | 16 |
| SODO1202 | 14/02/2012 | 8.5 | M=4.5 | -21.92 | -24.94 | -18.08 | 43 | Aluvial | 101 | 16 |
| VHSA0910 | 29/10/2009 | 1 | M=5.5 | 1.22 | 0.99 | 0.33 | 335 | Blando | 23 | 13 |

| Sismos Intraplaca | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| AE0220170919181440 | 19/09/2017 | 5 | Mc=7.1 | 96.18 | 114.86 | 42.17 | 120 | Arcilloso | 2232 | 57 |
| AL0120170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 117.12 | 108.56 | 40.19 | 124 | Arcillas | 2232 | 57 |
| AU1120170919181440 | 19/09/2017 | 5 | Mc=7.1 | 72.11 | 90.45 | 35.17 | 118 | Arcillas | 2234 | 57 |
| BA4920170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 88.94 | 113.16 | 30.64 | 122 | Arcillas | 2233 | 57 |
| BL4520170919181440 | 19/09/2017 | 2.7 | Mc=7.1 | 102.27 | 114.47 | 39.70 | 123 | Arcillas | 2232 | 57 |
| BO3920170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 77.91 | 95.14 | 24.11 | 126 | Arcillas | 2232 | 57 |
| CA5920170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 83.50 | 89.83 | 35.62 | 122 | Arcillas | 2233 | 57 |
| CDAO0201 | 16/01/2002 | 3 | Me=6.7 | -2.08 | -3.30 | -1.09 | 756 | Arcillas | 2240 | 76 |
| CDAO0201 | 16/01/2002 | 0.75 | Me=6.7 | 2.10 | -2.22 | 0.70 | 756 | Arcillas | 2240 | 76 |
| CDAO0201 | 16/01/2002 | 1.1 | Me=6.7 | -1.61 | -2.45 | -0.60 | 756 | Arcillas | 2240 | 76 |
| CDAO0608 | 11/08/2006 | 3 | M=5.9 | -4.59 | 5.80 | 1.83 | 268 | Arcillas | 2240 | 51 |
| CDAO0802 | 12/02/2008 | 2 | M=6.6 | 3.76 | -2.68 | 0.99 | 618 | Arcillas | 2240 | 90 |

| Sismos Intraplaca | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| CDAO0802 | 12/02/2008 | 1 | M=6.6 | -2.17 | 2.76 | -0.68 | 618 | Arcillas | 2240 | 90 |
| CDAO0804 | 28/04/2008 | 2.7 | M=5.6 | -7.06 | -4.31 | -3.88 | 179 | Arcillas | 2240 | 52 |
| CDAO0804 | 28/04/2008 | 0.7 | M=5.6 | 2.96 | 1.83 | -0.97 | 179 | Arcillas | 2240 | 52 |
| CDAO0905 | 22/05/2009 | 5.5 | M=5.7 | 17.43 | -22.74 | 12.42 | 156 | Arcillas | 2240 | 45 |
| CDAO9705 | 22/05/1997 | 3.2 | Ms=6.0 | -5.11 | -4.66 | -2.55 | 320 | Arcillas | 2240 | 59 |
| CDAO9906 | 21/06/1999 | 4 | Me=6.2 | -5.88 | -7.64 | -2.67 | 330 | Arcillas | 2240 | 54 |
| CE2320170919181440 | 19/09/2017 | 5 | Mc=7.1 | 52.09 | 59.99 | 26.55 | 124 | Arcillas | 2233 | 57 |
| CI0520170919181440 | 19/09/2017 | 1.6 | Mc=7.1 | 113.32 | 114.24 | 51.20 | 124 | Arcillas | 2233 | 57 |
| CJ0320170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 111.99 | 98.03 | 36.39 | 122 | Arcillas | 2233 | 57 |
| CO5620170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 109.76 | 113.99 | 53.82 | 124 | Arcillas | 2233 | 57 |
| DFVG9906 | 15/06/1999 | 2.5 | Me=7.0 | -34.82 | -48.61 | 20.89 | 226 | Arcilla compacta | 2240 | 69 |
| DM1220170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 87.54 | 90.52 | 41.03 | 122 | Arcillas | 2232 | 57 |
| DX3720170919181440 | 19/09/2017 | 1 | Mc=7.1 | 187.73 | 123.94 | 52.37 | 114 | Arcillas | 2240 | 57 |
| GA6220170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 97.07 | 84.03 | 33.66 | 124 | Arcillas | 2232 | 57 |
| GC3820170919181440 | 19/09/2017 | 1.8 | Mc=7.1 | 125.62 | 124.20 | 43.17 | 110 | Arcillas | 2233 | 57 |
| HJ7220170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 90.33 | 96.40 | 40.60 | 123 | Arcillas | 2232 | 57 |
| JA4320170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 82.88 | 106.29 | 47.83 | 120 | Arcillas | 2234 | 57 |
| JC5420170919181440 | 19/09/2017 | 1.2 | Mc=7.1 | 220.27 | 204.11 | 59.85 | 111 | Arcillas | 2237 | 57 |
| LI5820170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 95.81 | 89.91 | 51.12 | 124 | Arcillas | 2233 | 57 |
| LV1720170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 123.02 | 104.14 | 25.93 | 130 | Arcillas | 2233 | 57 |
| MI1520170919181440 | 19/09/2017 | 1.6 | Mc=7.1 | 207.19 | 133.43 | 55.29 | 108 | Arcillas | 2237 | 57 |
| MY1920170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 119.88 | 111.65 | 85.39 | 111 | Arcillas | 2237 | 57 |
| PD4220170919181440 | 19/09/2017 | 4 | Mc=7.1 | 83.77 | 96.26 | 42.37 | 119 | Arcillas | 2234 | 57 |
| PE1020170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 101.41 | 124.56 | 31.15 | 118 | Arcillas | 2232 | 57 |
| RM4820170919181440 | 19/09/2017 | 3 | Mc=7.1 | 61.07 | 78.01 | 37.85 | 124 | Arcillas | 2232 | 57 |
| SCT19705 | 22/05/1997 | 1.8 | Ms=6.0 | 4.39 | 4.41 | 1.96 | 315 | Arcillas | 2240 | 59 |
| SCT19906 | 15/06/1999 | 6 | Me=7.0 | 31.34 | 30.47 | 13.28 | 227 | Arcillas | 2240 | 69 |
| SCT19906 | 21/06/1999 | 10 | Me=6.2 | -5.42 | 4.55 | 4.50 | 326 | Arcillas | 2240 | 54 |
| SCT20608 | 11/08/2006 | 2 | M=5.9 | 4.30 | -4.56 | 1.85 | 264 | Arcillas | 2240 | 51 |
| SCT20802 | 12/02/2008 | 2 | M=6.6 | -2.73 | -4.18 | 1.67 | 624 | Arcillas | 2240 | 90 |
| SCT20905 | 22/05/2009 | 2 | M=5.7 | -10.96 | -10.86 | -7.56 | 161 | Arcillas | 2240 | 45 |
| SCT21112 | 11/12/2011 | 2 | M=6.5 | 19.78 | 21.72 | 9.35 | 196 | Arcillas | 2240 | 58 |
| SCT21211 | 15/11/2012 | 2 | M=6.1 | -6.06 | -5.37 | -4.40 | 204 | Arcillas | 2240 | 40 |
| SCT21306 | 16/06/2013 | 2 | M=5.8 | -31.72 | 18.18 | 13.38 | 151 | Arcillas | 2240 | 60 |
| SCT21709 | 19/09/2017 | 2 | M=7.1 | -90.33 | 91.68 | 41.77 | 120 | Arcillas | 2240 | 57 |
| SCT29906 | 15/06/1999 | 2 | Me=7.0 | 30.18 | -29.90 | 12.28 | 227 | Arcillas | 2240 | 69 |
| SCT29906 | 21/06/1999 | 7.8 | Me=6.2 | -5.46 | 4.46 | 4.28 | 326 | Arcillas | 2240 | 54 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| Sismos Intraplaca | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| SI5320170919181440 | 19/09/2017 | 1.5 | Mc=7.1 | 129.03 | 177.57 | 56.78 | 118 | Arcillas | 2235 | 57 |
| SXSO8010 | 24/10/1980 | | Mc=7.00 | 33.65 | 16.86 | 0.00 | 179 | Arcillas | 2240 | 70 |
| SXVI8010 | 24/10/1980 | | Mc=7.00 | -46.62 | 0.00 | 0.00 | 177 | Arcillas | 2240 | 70 |
| TH3520170919181440 | 19/09/2017 | 6 | Mc=7.1 | 189.94 | 186.69 | 58.99 | 102 | Arcillas | 2238 | 57 |
| TL0820170919181440 | 19/09/2017 | 2 | Mc=7.1 | 82.85 | 81.21 | 30.18 | 125 | Arcillas | 2232 | 57 |
| TL5520170919181440 | 19/09/2017 | 1.8 | Mc=7.1 | 82.46 | 69.20 | 33.57 | 126 | Arcillas | 2232 | 57 |
| TLHB9906 | 15/06/1999 | 8 | Me=7.0 | -25.93 | 22.64 | -16.80 | 206 | Arcillas | 2240 | 69 |
| UC4420170919181440 | 17/09/2017 | 1.2 | Mc=7.1 | 125.32 | 124.93 | 41.73 | 125 | Arcillas | 2234 | 57 |
| VG0920170919181440 | 17/09/2017 | 2.5 | Mc=7.1 | 119.54 | 101.85 | 36.45 | 125 | Arcillas | 2233 | 57 |
| VM2920170919181440 | 17/09/2017 | 2.1 | Mc=7.1 | 85.24 | 94.83 | 35.91 | 118 | Arcillas | 2234 | 57 |
| XP0620170919181440 | 17/09/2017 | 2.5 | Mc=7.1 | 81.74 | 108.19 | 30.98 | 122 | Arcillas | 2232 | 57 |

| Sismos subducción | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| AL140995 | 14/09/1995 | 2 | ME=7.3 | 40.99 | 35.20 | 10.16 | 349 | Arcillas | 2232 | 22 |
| CAOE0301 | 22/01/2003 | 5 | Me=7.6 | 19.56 | 27.29 | -6.27 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| CAOO0301 | 22/01/2003 | 2 | Me=7.6 | 20.15 | -26.81 | -5.53 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| CAOT0301 | 22/01/2003 | 2 | Me=7.6 | -18.75 | -19.70 | 4.06 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| CDAF8509 | 21/09/1985 | 2.2 | Mc=7.5 | -41.15 | -28.71 | -11.48 | 305 | Arcillas | 2240 | 15 |
| CDAF8509 | 19/09/1985 | 4 | Mc=8.10 | -86.00 | 117.49 | 25.81 | 452 | Arcillas | 2240 | 15 |
| CDAO0301 | 22/01/2003 | 3.5 | Me=7.6 | -18.35 | 20.11 | 5.42 | 576 | Arcillas | 2240 | 9 |
| CDAO8509 | 21/09/1985 | 4 | Mc=7.5 | 46.89 | -31.58 | 12.44 | 304 | Arcillas | 2240 | 15 |
| CDAO8509 | 19/09/1985 | 4 | Mc=8.10 | 65.32 | -84.61 | 34.34 | 451 | Arcillas | 2240 | 15 |
| CDAO9412 | 10/12/1994 | 4 | Mc=6.30 | 13.17 | -19.64 | -6.46 | 312 | Arcillas | 2240 | 20 |
| CDAO9509 | 14/09/1995 | 4 | Mc=7.3 | -37.08 | -32.13 | -7.54 | 341 | Arcillas | 2240 | 22 |
| CDAO9509 | 14/09/1995 | 0.7 | Mc=7.3 | -1.11 | 1.95 | 0.40 | 341 | Arcillas | 2240 | 22 |
| CDAO9701 | 11/01/1997 | 3 | Ms=6.9 | 24.67 | -25.59 | -4.60 | 467 | Arcillas | 2240 | 16 |
| CJ140995 | 14/09/1995 | 1.8 | ME=7.3 | 24.90 | 26.09 | 10.54 | 346 | Arcillas | 2233 | 22 |
| CLON0301 | 22/01/2003 | 2 | Me=7.6 | 24.32 | 26.66 | -7.24 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| CO101294 | 10/12/1994 | 2.2 | Mc=6.30 | 17.23 | 17.58 | 8.14 | 309 | Arcillas | 2233 | 20 |
| CO140995 | 14/09/1995 | 2 | Me=7.3 | 44.31 | 45.42 | 20.65 | 347 | Arcillas | 2233 | 22 |

| Sismos subducción | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|---------|-------------------|--|--|--|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| CUPJ140995 | 14/09/1995 | 1.8 | Me=7.3 | 24.52 | 27.08 | 11.29 | 346 | Arcillas | 2233 | 22 |
| DFVG9412 | 10/12/1994 | 3 | Mc=6.30 | -11.48 | -2.63 | -4.67 | 312 | Arcilla compacta | 2240 | 20 |
| DFVG9509 | 14/09/1995 | 2.8 | Mc=7.3 | -22.73 | -6.82 | -7.42 | 347 | Arcilla compacta | 2240 | 22 |
| GA101294 | 10/12/1994 | 2 | Mc=6.30 | 14.01 | 15.22 | 4.34 | 312 | Arcillas | 2232 | 20 |
| GA140995 | 14/09/1995 | 2 | Me=7.3 | 29.99 | 26.08 | 9.49 | 349 | Arcillas | 2232 | 22 |
| JA101294 | 10/12/1994 | 3 | Mc=6.30 | 12.36 | 10.95 | 4.70 | 311 | Arcillas | 2234 | 20 |
| JA140995 | 14/09/1995 | 2.8 | ME=7.3 | 27.89 | 24.71 | 9.75 | 345 | Arcillas | 2234 | 22 |
| JPSK0301 | 22/01/2003 | 5 | Me=7.6 | 17.88 | -14.51 | -5.63 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| NONP7811 | 29/11/1978 | | Ms=7.80 | 24.57 | -18.96 | 0.00 | 470 | Arcillas | 2240 | 19 |
| PE140995 | 14/09/1995 | 2.2 | Me=7.3 | 32.08 | 30.32 | 7.58 | 343 | Arcillas | 2232 | 22 |
| PMOP0301 | 22/01/2003 | 5 | Me=7.6 | 4.21 | -3.86 | -2.13 | 570 | Arcillas | 2240 | 9 |
| PMOS0301 | 22/01/2003 | 2.2 | Me=7.6 | -22.04 | -22.03 | 5.52 | 570 | Arcillas | 2240 | 9 |
| PRJP0301 | 22/01/2003 | 4 | Me=7.6 | -4.77 | 4.15 | 1.78 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| PRJS0301 | 22/01/2003 | 5 | Me=7.6 | 28.03 | 24.74 | -5.90 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| PROM0301 | 22/01/2003 | 2.2 | Me=7.6 | -21.05 | 24.03 | 6.47 | 570 | Arcillas preconsolidada | 2240 | 9 |
| ROM101294 | 10/12/1994 | 1.8 | Mc=6.30 | -13.88 | -11.96 | -4.31 | 307 | Transición | 2240 | 20 |
| ROMAS101294 | 10/12/1994 | 2.5 | Mc=6.3 | -19.56 | 16.48 | 6.26 | 309 | Arcilla limosa | 2235 | 20 |
| ROMBS101294 | 10/12/1994 | 2.5 | Mc=6.3 | -10.28 | -13.86 | 3.66 | 309 | Arcilla limosa | 2235 | 20 |
| ROMBS140995 | 14/09/1995 | 2 | Mc=7.3 | 23.47 | 25.27 | 15.69 | 347 | Arcilla limosa | 2235 | 22 |
| ROMBS241093 | 24/10/1993 | 2.8 | Mc=6.70 | -6.65 | 8.21 | 3.94 | 336 | Arcilla limosa | 2235 | |
| ROMCS140995 | 14/09/1995 | 5 | Mc=7.3 | -30.98 | 29.30 | -11.23 | 347 | Arcilla limosa | 2235 | 22 |
| ROMCS241093 | 24/10/1993 | 2.5 | Mc=6.70 | 10.99 | 7.87 | -5.74 | 336 | Arcilla limosa | 2235 | |
| SCT101294 | 10/12/1994 | 3 | Mc=6.30 | 10.77 | -13.88 | 5.26 | 308 | Arcillas | 2240 | 20 |
| SCT10301 | 22/01/2003 | 8.7 | Me=7.6 | 23.50 | 17.75 | 3.88 | 570 | Arcillas | 2240 | 9 |
| SCT18509 | 19/09/1985 | 7 | Mc=8.10 | 93.78 | 161.63 | -35.81 | 446 | Arcillas | 2240 | 15 |
| SCT190985 | 19/09/1985 | 7 | Mc=8.10 | 93.78 | 161.63 | -35.81 | 446 | Arcillas | 2240 | 15 |
| SCT19412 | 10/12/1994 | 3 | Mc=6.30 | 10.77 | -13.88 | 5.26 | 308 | Arcillas | 2240 | 20 |
| SCT19701 | 11/01/1997 | 2 | Ms=6.9 | 11.26 | -12.03 | 4.62 | 463 | Arcillas | 2240 | 16 |
| SCT20301 | 22/01/2003 | 2 | Me=7.6 | 21.92 | 17.51 | 4.14 | 570 | Arcillas | 2240 | 9 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| Sismos subducción | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|---------|-------------------|--|--|--|-------------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Clave | Fecha | T1 s | Magnitud sismo | Acel máx. N-S cm/s ² | Acel máx. E-O cm/s ² | Acel máx. V cm/s ² | Distancia epicentral km | Suelo estación | Altitud estación km | Profundidad focal km |
| SCT21203 | 20/03/2012 | 1.8 | M=7.4 | 31.06 | -36.99 | 10.68 | 356 | Arcillas | 2240 | 16 |
| SCT21204 | 11/04/2012 | 6.5 | M=6.4 | -4.79 | 5.58 | -1.73 | 465 | Arcillas | 2240 | 16 |
| SCT21404 | 18/04/2014 | 1.8 | M=7.2 | -28.34 | 34.11 | - 12.10 | 335 | Arcillas | 2240 | 10 |
| SCT21405 | 08/05/2014 | 1.8 | M=6.4 | -22.91 | 21.37 | -8.39 | 318 | Arcillas | 2240 | 17 |
| SCT29412 | 10/12/1994 | 2 | Mc=6.30 | 11.17 | -15.26 | 5.97 | 308 | Arcillas | 2240 | 20 |
| SCT29509 | 14/09/1995 | 2.2 | Mc=7.3 | 26.44 | 32.21 | 13.41 | 344 | Arcillas | 2240 | 22 |
| SXSO7903 | 14/03/1979 | 2.4 | Mb=7.00 | -33.37 | -30.07 | - 14.02 | 316 | Arcillas | 2240 | 28 |
| SXVI8509 | 19/09/1985 | * | Mc=8.10 | 0.00 | 0.00 | 16.75 | 442 | Arcillas | 2240 | 15 |
| TL101294 | 10/12/1994 | 2 | Mc=6.30 | 14.95 | 14.44 | 3.89 | 313 | Arcillas | 2232 | 20 |
| TL101294_2 | 10/12/1994 | 1.8 | Mc=6.30 | 9.79 | 12.97 | 4.52 | 311 | Arcillas | 2232 | 20 |
| TL140995 | 14/09/1995 | 2 | Me=7.3 | 26.73 | 28.91 | 9.68 | 350 | Arcillas | 2232 | 22 |
| TL140995_2 | 14/09/1995 | 2 | ME=7.3 | 29.94 | 19.52 | 7.10 | 349 | Arcillas | 2232 | 22 |
| TLHB8509 | 19/09/1985 | 7 | Mc=8.10 | - 135.88 | 106.67 | 23.98 | 457 | Arcillas | 2240 | 15 |
| TLHB9701 | 11/01/1997 | 4.5 | Ms=6.9 | -43.73 | -34.07 | 8.09 | 473 | Arcillas | 2240 | 16 |
| TLHD8509 | 21/09/1985 | 2.3 | Mc=7.50 | 49.41 | 51.58 | 34.58 | 306 | Arcillas | 2240 | 15 |
| TLHD8509 | 19/09/1985 | 4 | Mc=8.10 | 117.67 | 111.55 | - 59.30 | 455 | Arcillas | 2240 | 15 |
| TLHD9509 | 14/09/1995 | 4 | Mc=7.3 | 54.55 | -41.15 | 27.75 | 332 | Arcillas | 2240 | 22 |
| TLHD9701 | 11/01/1997 | 2.5 | Ms=6.9 | -23.65 | -24.97 | 13.78 | 471 | Arcillas | 2240 | 16 |
| XP101294 | 10/12/1994 | 3 | Mc=6.30 | 16.55 | 15.47 | 4.97 | 311 | Arcillas | 2232 | 20 |

Anexo 2 Programa de diseño con Python 3

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
"""
```

```
Created on Mon Apr 22 22:52:25 2019
```

```
@author: Ernesto Patiño Altamirano
```

```
Correo: ernesto.pa.alt@gmail.com
```

```
Programa para diseñar columnas ocupando el método de diseño
```

```
presentado en la tesis de maestría
```

```
"""
```

```
#librerias
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
import openpyxl
```

```
#funciones
```

```
"""Interpolacion lineal"""
```

```
def inter_lineal(X1,X2,Y1,Y2,X):
```

```
    DX = X2 - X1
```

```
    DY = Y2 - Y1
```

```
    Y = ((DY)/(DX))*(X-X1)+Y1
```

```
    return(Y)
```

```
"""Programa para encontrar el numero mas cercano en una lista"""
```

```
def proximo(final,numeros):
```

```
    def el_menor(numeros):
```

```
        menor = numeros[0]
```

```
        retorno = 0
```

```
        for x in range(len(numeros)):
```

```
            if numeros[x]<menor:
```

```
                menor = numeros[x]
```

```

    retorno= x
    return(retorno)

diferencia = []
for x in range(len( numeros)):
    diferencia.append(abs(final - numeros[x]))
return numeros[el_menor(diferencia)]

"""Subrutina para calcular las funciones de impedancia de una cimentación superficial"""
def resortes_dinamicos_superficial(Bs,Hs,gama_s,vs,sci_suelo,Gs,A,I,Df,w):
    #Calculo de radios equivalentes
    Rx = (A/np.pi)**0.5
    Rr = ((4*I)/np.pi)**0.25
    Rv = Rx
    #Calculo de rigideces estáticas
    Kx0 = (8*Gs*Rx/(2-vs))*(1+(Rx/(2*Hs)))*(1+(2*Df)/(3*Rx))*(1+((5*Df)/(4*Hs)))
    Kr0 = ((8*Gs*Rr**3)/(3*(1-vs)))*(1+(Rr/(6*Hs)))*(1+((2*Df)/(Rr)))*(1+((0.71*Df)/Hs))
    Kv0 = ((4*Gs*Rv)/(1-vs))*(1+((Rv*1.28)/(Hs)))*(1+(Df/(2*Rv)))*(1+((Df/Hs)/(1-(Df/Hs)))*(0.85-((Df*0.28)/Rv)))
    #Parametros de frecuencia
    nx = (w*Rx)/Bs
    nr = (w*Rr)/Bs
    nv = nx
    ns = (np.pi*Rx)/(2*Hs)
    npp = ((np.pi*Rr)/(2*Hs))*((2*(1-vs))/(1-2*vs))**0.5

    nxs = nx/ns
    nrp = nr/npp

    #Coeficientes de impedancia de rigidez
    kx = 1
    kv = 1

    if nr <= 2.5:
        kr = 1-(0.2*nr)
    elif (nr > 2.5) and (vs <= 1/3):

```

```
kr = 0.5
elif (nr > 2.5) and (vs >= 0.45):
    kr = 1-(0.2*nr)
else:
    kr = inter_lineal(1/3,0.45,0.5,(1-(0.2*nr)),vs)

#coeficientes de impedancia de amortiguamiento
if nxs <=1:
    cx = (0.65*sci_suelo*nxs)/(1-(1-(2*sci_suelo))*nxs**2)
else:
    cx = 0.576

if nv < npp:
    cv = 0
else:
    Df_Rv = Df/Rv
    cv = 0.85*((1+(1.85*(1-vs)*Df_Rv))/(1+(0.5*Df_Rv)))

if nrp <=1:
    cr = (0.5*sci_suelo*nrp)/(1-(1-(2*sci_suelo))*nrp**2)
else:
    cr = (0.3*nr**2)/(1+(nr**2))

#Rigidez de impedancia
Kx =Kx0*(kx-(2*sci_suelo*nx*cx))
Kr =Kr0*(kr-(2*sci_suelo*nr*cr))
Kv =Kv0*(kv-(2*sci_suelo*nv*cv))

#Amortiguamiento de impedancia
Cx = Kx0*(nx*cx+2*sci_suelo*kx)/w
Cr = Kr0*(nr*cr+2*sci_suelo*kr)/w
Cv = Kv0*(nv*cv+2*sci_suelo*kv)/w

return(Kx,Kr,Kv,Cx,Cr,Cv)
```

```
"""Subrutina para calcular las funciones individuales de pilotes"""
def resortes_dinamicos_pilas(Ep,d,Lp,w,vs,sci_suelo,Hs,Gs,Bs,Es):
    #Revision de longitud crítica de un pilote
    Lc = 2*d*((Ep/Es)**0.25)

    if Lp > Lc:
        print("El pilote es flexible")
    else:
        print("El pilote no es lo suficientemente flexible")

    #Calculo de rigideces estáticas de pilote
    Kx0 = Es*d*((Ep/Es)**0.21)
    Kv0 = 1.9*Es*d*((Lp/d)**0.67)
    Kr0 = 0.15*(d**3)*Es*((Ep/Es)**0.75)

    #Parametros de frecuencia
    ns = (np.pi*d)/(2*Hs)
    npp = (3.4*ns)/(np.pi*(1-vs))
    n = (d*(w))/Bs

    #Coeficientes de impedancia de rigidez
    kx = 1

    if (Lp/d) < 15:
        kv = 1
    elif (Lp/d) >= 50:
        kv = 1+(n)**0.5
    else:
        kv = inter_lineal(15,50,1,1+(n)**0.5,Lp/d)

    kr= 1

    #Coeficientes de impedancia de amortiguamiento
    if n <= ns:
        cx = 0.8*sci_suelo
```

```
else:
    cx = 0.8*sci_suelo + (0.175*n*(Ep/Es)**0.17)

if n <= npp:
    cv = 0
elif n > 1.5*npp:
    constante1 = 1-(np.exp((- (Ep/Es)*(Lp/d)**-2)))
    constante2 =(0.413/(1+vs))
    constante3 =((Lp/d)**0.33)
    constante4=(n**0.8)
    cv = constante1*constante2*constante3*constante4
else:
    constante1 = 1-(np.exp((- (Ep/Es)*(Lp/d)**-2)))
    constante2 =(0.413/(1+vs))
    constante3 =((Lp/d)**0.33)
    constante4=(n**0.8)
    constante_cv = constante1*constante2*constante3*constante4
    cv = inter_lineal(npp,1.5*npp,0,constante_cv,n)

if n <= ns:
    cr = sci_suelo*0.25
else:
    cr = sci_suelo*0.25 + 0.056*((Ep/Es)**0.2)*n

#Rigidez dinámica de pilas
Kx = Kx0*kx
Kr = Kr0*kr
Kv = Kv0*kv

#Amortiguamiento dinámica de pilas
Cx = (2*Kx0*cx)/w
Cr = (2*Kr0*cr)/w
Cv = (2*Kv0*cv)/w

return(Kx,Kr,Kv,Cx,Cr,Cv)
```

```
""" Subrutina para calcular el efecto en un grupo de pilotes """
```

```
def efecto_grupo(x,y,d,Bs,vs,sci_suelo,w):
```

```
    #constantes
```

```
    r=d/2
```

```
    BLa = 3.4*Bs/(3.1416*(1-vs))
```

```
    imaginario = complex(0,1)
```

```
    #matrices requeridas
```

```
    S = np.zeros([len(x),len(y)]).astype(np.complex)
```

```
    ah = np.zeros([len(x),len(y)]).astype(np.complex)
```

```
    av = np.zeros([len(x),len(y)]).astype(np.complex)
```

```
    ex = np.zeros(len(x))
```

```
    #Calculo de la distancia de las pilas a su eje neutro
```

```
    Cx = 0
```

```
    for i in range(len(x)):
```

```
        Cx = Cx + x[i]
```

```
    Cx = Cx / len(x)
```

```
    for i in range(len(x)):
```

```
        ex[i] = -x[i] + Cx
```

```
    #Calculo de matriz de distancias
```

```
    for i in range(len(x)):
```

```
        for j in range(len(y)):
```

```
            S[i,j] = (((x[i]-x[j])**2)+(y[i]-y[j])**2)**0.5
```

```
            S[i,i] = 1
```

```
    #Calculo de matrices alpha
```

```
    for i in range(len(x)):
```

```
        for j in range(len(y)):
```

```
    if i==j:
        ah[i,j] = 1
    else:
        ah[i,j] = ((S[i,j]/r)**-0.5)*np.exp(-sci_suelo*w*S[i,j]/BLa)*np.exp(-imaginario*w*S[i,j]/BLa)#((S[i,j]/r)**-
0.5)*np.exp(-(S[i,j]*sci_s*w)/(BLa))*((np.cos(-(S[i,j]*w)/(BLa)))+(imaginario*np.sin(-(S[i,j]*w)/(BLa))))

for i in range(len(x)):
    for j in range(len(y)):
        if i==j:
            av[i,j] = 1
        else:
            av[i,j] = ((S[i,j]/r)**-0.5)*np.exp(-(S[i,j]*sci_suelo*w)/(Bs))*((np.cos(-
(S[i,j]*w)/(Bs)))+(imaginario*np.sin(-(S[i,j]*w)/(Bs))))

#inversa de la matriz alpha
ah_inversa = np.linalg.inv(np.matrix(ah))
av_inversa = np.linalg.inv(np.matrix(av))

#Calculo del factor de grupo
FGh = 0
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(x)):
        FGh = FGh + ah_inversa[i,j]

FGv = 0
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(x)):
        FGv = FGv + av_inversa[i,j]

FGr = 0
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(x)):
        FGr = FGr + av_inversa[i,j]*ex[j]*ex[i]

FGr2 = 0
for i in range(len(x)):
```

```

    FGr2 = FGr2 + abs(ex[i])**2

FGr3 = 0
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(x)):
        FGr3 = FGr3 + av_inversa[i,j]*abs(ex[i]*ex[j])
FGr4 = 0
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(x)):
        FGr4 = FGr4 + av_inversa[i,j]*abs(ex[i]*ex[i])

return(FGh,FGv,FGr,FGr2,FGr3,FGr4)

""" Suma de rigideces"""
def suma_resortes(w,FGx,FGv,FGr,numero_pilas,
                 Kx_cimentacion,Cx_cimentacion,Kr_cimentacion,Cr_cimentacion,Kv_cimentacion,Cv_cimentacion,
                 Kx_pilas,Cx_pilas,Kr_pilas,Cr_pilas,Kv_pilas,Cv_pilas):

    imaginario = complex(0,1)
    #cajon
    Kx_Cx_cimentación = (Kx_cimentacion+Cx_cimentacion*imaginario*w)
    Kv_Cv_cimentación = (Kv_cimentacion+Cv_cimentacion*imaginario*w)
    Kr_Cr_cimentación = (Kr_cimentacion+Cr_cimentacion*imaginario*w)

    #pilotes
    Kx__Cx_pilas = (Kx_pilas+Cx_pilas*imaginario*w)
    Kv_Cv_pilas = (Kv_pilas+Cv_pilas*imaginario*w)
    Kr_Cr_pilas = (Kr_pilas+Cr_pilas*imaginario*w)

    #suma de efectos
    Kx_Cx = FGx*Kx__Cx_pilas+Kx_Cx_cimentación
    Kv_Cv = FGv*Kv_Cv_pilas+Kv_Cv_cimentación
    Kr_Cr = FGr*Kv_Cv_pilas+Kr_Cr_cimentación+Kr_Cr_pilas*numero_pilas

    Kx = Kx_Cx.real

```



```

Kr = Kr_Cr.real
Kv = Kv_Cv.real
Cx = Kx_Cx.imag/w
Cr = Kr_Cr.imag/w
Cv = Kv_Cv.imag/w

return(Kx,Cx,Kr,Cr,Kv,Cv)

"""Subrutina para calcular el periodo efectivo de una estructura"""
def periodo_efectivo(Me,H,Df,Te,sci_e,sci_suelo,Kx,Kr,Cx,Cr):
    Ht = H+Df
    Tx = 2*np.pi*(Me/Kx)**0.5
    Tr = 2*np.pi*((Me/Ht**2)/Kr)**0.5
    T_efectivo = ((Tx**2)+(Tr**2)+(Te**2))**0.5

    sci_x = (np.pi*Cx)/(T_efectivo*Kx)
    sci_r =(np.pi*Cr)/(T_efectivo*Kr)

    sci_efectivo =
    (sci_e*(Te/T_efectivo)**3)+(((1/(1+(2*sci_x**2))))*sci_x*(Tx/T_efectivo)**2)+(((1/(1+(2*sci_r**2))))*sci_r*(Tr/T_efectivo)**2))

    w_e = (2*np.pi)/Te
    w_x = (2*np.pi)/Tx
    w_r = (2*np.pi)/Tr
    w_efectivo = (2*np.pi)/T_efectivo

    sci_efectivo_Aviles = (sci_e*((w_efectivo**3)/(w_e**3)))+(sci_x*((w_efectivo**3)/(w_x**3)))
    +(sci_r*((w_efectivo**3)/(w_r**3))) +(sci_suelo*(1-((w_efectivo**2)/(w_e**2))))

    return(T_efectivo,sci_efectivo,sci_efectivo_Aviles)

"""Obtención de las fuerzas de una hoja de excel"""
def fuerzas_registro(direccion,nombre_hoja_excel,canal,factor_escalas):
    canal = canal-1
    doc = pd.read_excel(direccion,nombre_hoja_excel)
    P = doc.iloc[:,canal]
    numero_datos = len(P)
    nstep = numero_datos-1
    P = P[1:numero_datos]

```

```

Px = np.zeros(nstep)
for i in range(nstep):
    Px[i] = P.iloc[i]*factor_escala
return(nstep,Px,doc)

"""Respuesta paso a paso lineal metodo de Newmark"""
def newmark(nstep,sci,dt,m,u0,v0,g,B,T,Px):
    #if (dt/T)>((1/(3.1416*(2)**0.5))*((1/((g-2*B)**0.5)))):
    # "El metodo de newmark no es estable"
    wn = (2* 3.1416)/T
    k = m * wn**2
    C = sci *2* wn * m
    #matrices y/o vectores
    t = np.array(np.zeros(nstep))
    u = np.array(np.zeros(nstep))
    v = np.array(np.zeros(nstep))
    ac = np.array(np.zeros(nstep))
    dP = np.array(np.zeros(nstep))
    du = np.array(np.zeros(nstep))
    dv = np.array(np.zeros(nstep))
    dac = np.array(np.zeros(nstep))
    for i in range(nstep):
        t[i] = dt * i
    #1 calculos iniciales
    ac0 = (Px[0] - (C * v0) - (k * u0)) / m
    K = k + ((g / (B * dt)) * C) + ((1 / (B * dt**2)) * m)
    a = ((1 / (dt * B)) * m) + ((g / B) * C)
    b = ((1 / (2 * B)) * m) + (((g / (B * 2)) - 1) * C * dt)
    u[0] = u0
    v[0] = v0
    ac[0] = ac0
    #calculos por pasos
    for i in range (nstep-1):
        dP[i] = (Px[i+1] - Px[i]) + (a * v[i]) + (b * ac[i])
        du[i] = dP[i] / K

```

```

dv[i] = ((g * du[i]) / (B * dt)) - ((g * v[i]) / B) + (dt * ac[i] * (1 - (g / (2 * B))))
dac[i] = ((du[i]) / (B * dt**2)) - (v[i] / (B * dt)) - (ac[i] / (2 * B))
u[i+1] = u[i] + du[i]
v[i+1] = v[i] + dv[i]
ac[i+1] = ac[i] + dac[i]

#maximos
return(t,u,ac,v)

"""calculo de distorsiones de fluencia"""
def distorsion(H,ey,D,pi_c):
    fi_y = 3.75*(ey/D)*(0.3+(11.2*pi_c)-(146*pi_c**2))
    gama_y = (1/3)*fi_y*H
    return(gama_y)

"""Subrutina para calcular el periodo agrietado"""
def T_agrietada(H,D,Ppuente,Ag,fc_columna,pi,Ig,E_columna,Me):
    Aconstante = (Ppuente/(Ag*fc_columna))*100
    Aconstante2 = 0.22+(13.44*pi)+(0.011*Aconstante)-(0.16*pi*Aconstante)
    lcr = Ig*Aconstante2
    Ke_cr = ((3*E_columna*lcr)/(H**3))
    Tcr=2*3.1416*(Me/Ke_cr)**0.5
    return(Tcr,Aconstante2)

"""Calculo de distorsiones ultimas"""
def distorsion_ultima(fyt,fc_columna,P,Ag,pst,H,D):
    constante_carga = (P/(Ag*fc_columna))
    H_D = H/D
    if constante_carga <0.15:
        B0 = 3.3-0.27*H_D
        B1 = 453.9+46.5*H_D
        B2 = 14.58-5.71*H_D
        B3 = 0.0422*H_D-0.37

    elif 0.15 <= constante_carga <= 0.2:

```

```
B0 = 0.7*H_D-3.68
B1 = 316.69+189.98*H_D
B2 = -(0.38+7.15*H_D)
B3 = 0.097-0.02*H_D

elif 0.2 <= constante_carga <= 0.25:
    B0 = 0.67*H_D-4.19
    B1 = 483.26+121.49*H_D
    B2 = -(8.48+3.79*H_D)
    B3 = 0.12-0.018*H_D
else:
    print("la carga es muy grande y no se recomienda")
    B0 = 0
    B1 = 0
    B2 = 0
    B3 = 0

lambda_e = pst
constante_carga = constante_carga*100
gama_u = (B0 +
          ((lambda_e*fyt/(14*fc_columna))*(B1+B2*(constante_carga)))
          +B3*(constante_carga) )
gama_u = gama_u/100
return(gama_u)

def lamda_e(fyt,fc_columna,P,Ag,gama_u,H,D):
    constante_carga = (P/(Ag*fc_columna))
    H_D = H/D
    if constante_carga <0.15:
        B0 = 3.3-0.27*H_D
        B1 = 453.9+46.5*H_D
        B2 = 14.58-5.71*H_D
        B3 = 0.0422*H_D-0.37

    elif 0.15 <= constante_carga <= 0.2:
```

```

B0 = 0.7*H_D-3.68
B1 = 316.69+189.98*H_D
B2 = -(0.38+7.15*H_D)
B3 = 0.097-0.02*H_D

elif 0.2 <= constante_carga <= 0.25:
    B0 = 0.67*H_D-4.19
    B1 = 483.26+121.49*H_D
    B2 = -(8.48+3.79*H_D)
    B3 = 0.12-0.018*H_D
else:
    print("la carga es muy grande y no se recomienda")
    B0 = 0
    B1 = 0
    B2 = 0
    B3 = 0
constante_carga = (P/(Ag*fc_columna))*100
lambda_e = (14*(fc_columna/fyt))*((gama_u*100)-B0-(B2*constante_carga))/(B1+(B3*constante_carga))
return(lambda_e)

"""calculo de desplazamientos inelasticos Ordaz y Perez Rocha"""
def inelastico_ordaz(mu,D,Dmax):
    #Dmax es el desplazamiento máximo del suelo
    BM = 0.388*(mu-1)**0.173
    Rm = (1 + (D/Dmax)**BM)*(mu-1)
    D_inelastico = D*(mu/Rm)
    return(D_inelastico)

"""Calculo de areas de varillas"""
def areas_varillas(numero_varillas,numero_varillas_longitudinales):
    varillas_distintas = len(numero_varillas)
    A_varillas = np.zeros(varillas_distintas)
    for i in range(varillas_distintas):
        A_varillas[i] = (0.25*3.1416*((numero_varillas[i]/8)*2.54)**2)*numero_varillas_longitudinales[i]
    A_acero = sum(A_varillas)

```

```
return(A_acero)

""""Datos iniciales""""

#Datos del programa
numero_iteraciones = 3

#Datos del suelo
Ts = 4 #s
Hs = 53 #m
Bs = (4*Hs)/Ts #m/s
gama_s = 1.25 #t/m3
vs = .49
sci_suelo = .05
Gs = Bs*Bs*(gama_s)/9.81 #t/m2
Es = 2*(1+vs)*Gs #t/m2

#Datos de la cimentación superficial
Base = 6.6 #m
Largo = 12 #m
A = 6.6*12 #m2
I = (12*6.6**3)/12 #m4
Df = 2.7 #m

#Datos de las pilas
Ep = 14000*10*(250)**0.5 #t/m2
d = 0.45 #m
Lp = 40 #m

#Datos del grupo de pilotes
numero_pilas = 26

y=[0,0,0,0,0,1.20,1.20,1.20,1.20,2.40,2.40,3.60,3.60,8.60,8.60,9.80,9.80,11.00,11.00,11.00,11.00,12.20,12.20,12.20,12.20,12.20] #m

x=[6.00,4.80,3.00,1.20,0,6.00,4.80,1.20,0,6.00,0,6.00,0,6.00,0,6.00,0,6.00,4.80,1.20,0,6.00,4.80,3.00,1.20,0] #m
```

#Datos de la estructura

Ppuente = 550#t #140,250,350,450,550

H = 3 #m #11,9,7,5,3

D = 1 #m

fc_columna = 3000 #t/m2

E_columna = 14000*10*(fc_columna*.1)**0.5 #t/m2

sci_e = 0.05

#Datos del refuerzo

pi_propuesto =0.01

pi_min = 0.01

pi_max = 0.04

pst = 0.00639783666667 #(0.005-0.008)

fy = 42000 #t/m2

Eacero = 21000000 #t/m2

ey = fy/Eacero #

fyt = 42000 #t/m2

alpha = 0

pst_max = 0.01

#Datos de detallado

recubrimiento = 0.06#m

numero_varillas = [10]

cantidad_varillas_longitudinales = [10]

numero_varillas_transversales = [4]

cantidad_varillas_transversales = [2]

Av_estribos = areas_varillas(numero_varillas_transversales,cantidad_varillas_transversales)*(0.01*.01)

#estribos del numero 3

s_estribos = .18

#Datos de sismos

u0= 0

v0 = 0

factor_escala = 1.5

factor_escalas = 1.5

direccion_sismo_servicio = ("C:\\Users\\lernes\\OneDrive\\Escritorio\\maestria\\TESIS-ISE\\diseño_puentes_metodo\\señales corregidas.xlsx")

nombre_hoja_excel_servicio = 'Acambay_50' #OZT TLHD DFVG

direccion_sismo_supervivencia = ("C:\\Users\\lernes\\OneDrive\\Escritorio\\maestria\\TESIS-ISE\\diseño_puentes_metodo\\señales corregidas.xlsx")

nombre_hoja_excel_supervivencia = 'Acambay_1000' #S_Acambay SCT JC

g_servicio = 0.5

B_servicio = 0.25

dt_servicio = 0.01 #0.01 0.02 0.01

canal_servicio = 1 #1 3 3

g_supervivencia = 0.5

B_supervivencia = 0.25

dt_supervivencia = 0.01 #0.01 0.01 0.01

canal_supervivencia = 1 #2 2 3

#datos de la impresion

impresion = "si"

nombre_excel = "C:\\Users\\lernes\\OneDrive\\Escritorio\\maestria\\TESIS-ISE\\diseño_puentes_metodo\\diseño paramétrico v2.xlsx"

hoja_impresion = "cortical"

posicion_columnas = 0

if Ppuente == 140:

 posicion_columnas = 0

elif Ppuente == 250:

 posicion_columnas = 1

elif Ppuente == 350:

 posicion_columnas = 2

elif Ppuente == 450:

 posicion_columnas = 3

elif Ppuente == 550:

 posicion_columnas = 4


```

if H == 11:
    columnas_H = ["B","C","D","E","F"]
if H == 9:
    columnas_H = ["H","I","J","K","L"]
if H == 7:
    columnas_H = ["N","O","P","Q","R"]
if H == 5:
    columnas_H = ["T","U","V","W","X"]
if H == 3:
    columnas_H = ["Z","AA","AB","AC","AD"]

```

```

columnas = [columnas_H[posicion_columnas]]
#subduccion, intraplaca, cortical

```

"""1-Calculo de propiedades, peso y masa"""

```

Me = Ppuente/9.81
lg = 0.25*3.1416*(D/2)**4 #m4
Ag = 0.25*np.pi*D**2 #m2
Ach = 0.25*3.1416*(D-2*recubrimiento)**2 #m2
P_esperada = 0.15*Ag*fc_columna

```

"""2-Proponer sección"""

```

if (H/D)<6:
    print("+La sección es adecuada por esbeltes")
else:
    print("-La sección no es adecuada por esbeltes, se requiere un diametro mas grande","D < ",(H/6))

```

```

if (Ppuente/(Ag*fc_columna)) < 0.25:
    print("+La sección es adecuada para la carga")
else:
    print("-La sección no es adecuada para la carga, se debe de aumentar la sección","D < ",(Ppuente/(fc_columna*0.25*0.25*3.1416))**0.5)

```

""3-Calculo del periodo agrietado""

$$K_e = ((3 * E_{columna} * I_g) / (H^3))$$

$$T_e = 2 * 3.1416 * (M_e / K_e)^{0.5}$$

$$T_{cr_factor} = T_{agrietada}(H, D, P_{puente}, A_g, f_c, E_{columna}, M_e)$$

$$T_{cr} = T_{cr_factor}[0]$$

$$w = (2 * 3.1416) / T_{cr}$$

""4-Revisión de ISE""

if $(T_{cr} / T_s) * (H_s / H) > 2.5$:

print("+Los efectos de ISE pueden despreciarse ")

$$T_{e_efectivo} = T_{cr}$$

$$s_{ci_efectivo} = s_{ci_e}$$

$$w_{efectivo} = (2 * 3.1416) / T_{e_efectivo}$$

else:

print("+Se recomienda seguir con el análisis con ISE")

#Calculo de resortes

$$\text{Resortes_superficiales} = \text{resortes_dinamicos_superficial}(B_s, H_s, \gamma_s, v_s, s_{ci_suelo}, G_s, A, I, D_f, w)$$

$$\text{Resortes_pilas} = \text{resortes_dinamicos_pilas}(E_p, d, L_p, w, v_s, s_{ci_suelo}, H_s, G_s, B_s, E_s)$$

$$\text{Factores_grupo} = \text{efecto_grupo}(x, y, d, B_s, v_s, s_{ci_suelo}, w)$$

$$K_x_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[0]$$

$$C_x_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[3]$$

$$K_r_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[1]$$

$$C_r_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[4]$$

$$K_v_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[2]$$

$$C_v_{cimentacion} = \text{Resortes_superficiales}[5]$$

$$K_x_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[0]$$

$$C_x_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[3]$$

$$K_r_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[1]$$

$$C_r_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[4]$$

$$K_v_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[2]$$

$$C_v_{pilas} = \text{Resortes_pilas}[5]$$

```
FGx = Factores_grupo[0]
FGv = Factores_grupo[1]
FGr = Factores_grupo[5]

Suma = suma_resortes(w,FGx,FGv,FGr,numero_pilas,
                    Kx_cimentacion,Cx_cimentacion,Kr_cimentacion,Cr_cimentacion,Kv_cimentacion,Cv_cimentacion,
                    Kx_pilas,Cx_pilas,Kr_pilas,Cr_pilas,Kv_pilas,Cv_pilas)
Kx = Suma[0]
Kr = Suma[2]
Cx = Suma[1]
Cr = Suma[3]

Te_sci = periodo_efectivo(Me,H,Df,Tcr,sci_e,sci_suelo,Kx,Kr,Cx,Cr)
Te_efectivo = Te_sci[0]
w_efectivo = (2*3.1416)/Te_efectivo

for i in range(numero_iteraciones):
    Resortes_superficiales =
resortes_dinamicos_superficial(Bs,Hs,gama_s,vs,sci_suelo,Gs,A,l,Df,w_efectivo)
    Resortes_pilas = resortes_dinamicos_pilas(Ep,d,Lp,w_efectivo,vs,sci_suelo,Hs,Gs,Bs,Es)
    Factores_grupo = efecto_grupo(x,y,d,Bs,vs,sci_suelo,w_efectivo)

Kx_cimentacion = Resortes_superficiales[0]
Cx_cimentacion = Resortes_superficiales[3]
Kr_cimentacion = Resortes_superficiales[1]
Cr_cimentacion = Resortes_superficiales[4]
Kv_cimentacion = Resortes_superficiales[2]
Cv_cimentacion = Resortes_superficiales[5]
Kx_pilas = Resortes_pilas[0]
Cx_pilas = Resortes_pilas[3]
Kr_pilas = Resortes_pilas[1]
Cr_pilas = Resortes_pilas[4]
Kv_pilas = Resortes_pilas[2]
Cv_pilas = Resortes_pilas[5]
FGx = Factores_grupo[0]
FGv = Factores_grupo[1]
```

FGr = Factores_grupo[5]

Suma = suma_resortes(w_efectivo,FGx,FGv,FGr,numero_pilas,
Kx_cimentacion,Cx_cimentacion,Kr_cimentacion,Cr_cimentacion,Kv_cimentacion,Cv_cimentacion,
Kx_pilas,Cx_pilas,Kr_pilas,Cr_pilas,Kv_pilas,Cv_pilas)

Kx = Suma[0]

Kr = Suma[2]

Cx = Suma[1]

Cr = Suma[3]

Te_sci = periodo_efectivo(Me,H,Df,Tcr,sci_e,sci_suelo,Kx,Kr,Cx,Cr)

Te_efectivo = Te_sci[0]

w_efectivo = (2*3.1416)/Te_efectivo

sci_efectivo = Te_sci[1]

""5-Calculo de demanda de desplazamientos""

fuerza_nstep_servicio =
fuerzas_registro(direccion_sismo_servicio,nombre_hoja_excel_servicio,canal_servicio,factor_escalas)

nstep_servicio = fuerza_nstep_servicio[0]

Px_servicio = fuerza_nstep_servicio[1]

respuesta_elastica_servicio =
newmark(nstep_servicio,sci_efectivo,dt_servicio,Me,u0,v0,g_servicio,B_servicio,Te_efectivo,Px_servicio)

D_ER_servicio = max(abs(min(respuesta_elastica_servicio[1])),max(respuesta_elastica_servicio[1]))*(Me)

De = ((Tcr/Te_efectivo)**2)*D_ER_servicio

#calculo de espectro

T_espectro = np.zeros(100)

U_espectro = np.zeros(100)

for i in range(100):

T_espectro[i] = (i+1)*.1

respuesta_elastica_servicio_espectro =
newmark(nstep_servicio,sci_efectivo,dt_servicio,Me,u0,v0,g_servicio,B_servicio,T_espectro[i],Px_servicio)

```
U_espectro[i] =
max(abs(min(respuesta_elastica_servicio_espectro[1])),max(respuesta_elastica_servicio_espectro[1]))*(Me)
```

```
"""6-Calculo de distorsiones de fluencia"""
```

```
gama = De/H
```

```
gama_max = distorsion(H,ey,D,pi_max)
```

```
gama_y =distorsion(H,ey,D,pi_propuesto)
```

```
"""7-Se compara la distrosión de fluencia contra la demandada"""
```

```
if gama<=gama_max:
```

```
    print("+La sección es adecuada para la cuantía longitudinal")
```

```
else:
```

```
    print("-La sección no es adecuada para la cuantia longitudinal se debe de cambiar")
```

```
"""8-Se calcula la cuantia óptima"""
```

```
Dy = gama_y*H
```

```
if (Dy/De)>1:
```

```
    print("+La cuantia longitudinal es adecuada")
```

```
else:
```

```
    print("-la cuantia longitudinal no es adecuada se debe de aumentar")
```

```
"""9- Se Propone la cuantia transversal"""
```

```
if pst>pst_max:
```

```
    print("-Tiene mucho acero transversal se debe de cambiar la sección")
```

```
Asmin1 = (0.25*(fc_columna*.8)**0.5)/fyt
```

```
Asmin2 = 0.12*(fc_columna/fyt)
```

```
Asmin3 = 0.3*(fc_columna/fyt)*((Ag/Ach)-1)
```

```
"""10-Se calcula la distorsión última y su desplazamiento"""
```

```
gama_u = distorsion_ultima(fyt,fc_columna,Ppuente,Ag,pst,H,D)
```

```
Du = gama_u*H
```

```
"""11-Se calcula la ductilidad"""
```

$\mu_{ductilidad} = D_u/D_y$

if $\mu_{ductilidad} > 3$:

print("La ductilidad es muy grande debería limitarse a que sea menor de 3")

$T_e T_{e_efectivo_cuad} = (T_{cr}^{**2}) / (T_{e_efectivo}^{**2})$

$\mu_{efectivo} = 1 + (\mu_{ductilidad} - 1) * (T_e T_{e_efectivo_cuad} + (\alpha * (1 - T_e T_{e_efectivo_cuad})))^{**} - 1$

""12-Calculo de demanda de desplazamientos inelásticos""

fuerza_nstep_supervivencia =
fuerzas_registro(direccion_sismo_supervivencia, nombre_hoja_excel_supervivencia, canal_supervivencia, factor_escalado)

nstep_supervivencia = fuerza_nstep_supervivencia[0]

Px_supervivencia = fuerza_nstep_supervivencia[1]

respuesta_elastica_supervivencia =
newmark(nstep_supervivencia, sci_efectivo, dt_supervivencia, Me, u0, v0, g_supervivencia, B_supervivencia, Te_efectivo, Px_supervivencia)

De_supervivencia_elastica =
max(abs(min(respuesta_elastica_supervivencia[1])), max(respuesta_elastica_supervivencia[1])) * (Me)

#calculo de espectro

T_espectro2 = np.zeros(100)

U_espectro2 = np.zeros(100)

for i in range(100):

T_espectro2[i] = (i+1)*.1

respuesta_elastica_supervivencia_espectro =
newmark(nstep_supervivencia, sci_e, dt_supervivencia, Me, u0, v0, g_supervivencia, B_supervivencia, T_espectro2[i], Px_supervivencia)

U_espectro2[i] =
max(abs(min(respuesta_elastica_supervivencia_espectro[1])), max(respuesta_elastica_supervivencia_espectro[1])) * (Me)

De_supervivencia_inelastica = inelastico_ordaz($\mu_{ductilidad}$, De_supervivencia_elastica, U_espectro2[99])

""13-Calculo de demanda de desplazamientos en la columna""

De_supervivencia = ($\mu_{ductilidad} / \mu_{efectivo}$) * ((T_{cr}^{**2}) / ($T_{e_efectivo}^{**2}$)) * De_supervivencia_inelastica

""14-Revisión de estabilidad""

```

lambdae = lamda_e(fyt,fc_columna,Ppuente,Ag,De_supervivencia/H,H,D)

if (Base/H) > (De_supervivencia_inelastica/H):
    print("+Es estable")
else:
    print("-no es estable y se debe de cambiar la dimensión de la cimentación")

"""15-Revisión de demanda dultima contra demanda de supervivencia"""
if Du >= De_supervivencia:
    print("+La cuantía transversal es adecuada")
else:
    print("-No es adecuada la cuantía transversal y se debe de aumentar")

"""16-Revisión de la fuerza cortante"""
S_estribos = ((Av_estribos*4) / (pst*(-(recubrimiento*2)+D)))
Vsr = (0.8*Av_estribos*fy*(D-recubrimiento))/(s_estribos)
wcr = (2* 3.1416)/Tcr
Kcr = Me * wcr**2
Vy = (Kcr * gama_y * H)
Kcr_efectivo = Me * w_efectivo**2
Vy_efectivo = (Kcr_efectivo * gama_y * H)

if Vy_efectivo >Vsr:
    print("-no resiste el cortante")
else:
    print("+La columna pasa la revisión por cortante")
pst_final = (Av_estribos*4)/(s_estribos*(-(recubrimiento*2)+D))

proceso = "no terminado"
print("\n")
print("1-Calculo de propiedades, peso y masa")
print("P=",Ppuente)
print("Me=",Me)
print("lg=",lg)

```

```
print("Ag=",Ag)
print("Ach=",Ach)

print("\n")
print("2-revisión de sección")
if (H/D)<6:
    print((H/D)," < ",6)
    if (Ppuente/(Ag*fc_columna)) < 0.25:
        print((Ppuente/(Ag*fc_columna))," < ",0.25)

print("\n")
print("3-Calculo de rigideces y periodos")
print("Ke=",Ke)
print("Te=",Te)
print("Tcr=",Tcr)
print("lcr/lg=",Tcr_factor[1])
print("w =",w)

print("\n")
print("4-Revisión de ISE")
print("2.5<(Tcr/Ts)*(Hs/H)", " ",2.5<(Tcr/Ts)*(Hs/H))
print("Te=",Te_efectivo)
print("sci_e=",sci_efectivo)

print("\n")
print("5-Calculo de demanda de desplazamientos")
print("Demanda de desplazamiento de servicio =",D_ER_servicio)
print("Demanda de desplazamiento de servicio efectivo =",De)

print("\n")
print("6-Calculo de distorsiones de fluencia")
print("gama=",gama)
print("gama_max=",gama_max)
print("gama_y=",gama_y)
```



```
if gama<=gama_max:
    print("\n")
    print("7-Se compara la distorsión de fluencia con la cuantía máxima contra la demandada")
    print("gama<=gama_max",gama<=gama_max)

    print("\n")
    print("8-Se calcula la cuantía óptima")

if (Dy/De)<=1:
    pi = 0.038-(0.0034-(0.0054*((D*gama)/(ey*H))))**0.5
    pi_recomendada = max(pi,pi_min,pi_propuesto+.005)
    print("Dy=",Dy)
    print("De=",De)
    print("Dy/De=",Dy/De)
    print("Cuantía recomendada = ",pi_recomendada)
else:
    print("Dy=",Dy)
    print("De=",De)
    print("Dy/De=",Dy/De)

    print("\n")
    print("9-Se propone la cuantía transversal")
    if pst>pst_max:
        print("Tiene mucho acero transversal se debe de cambiar la sección")
    else:
        print("Pst inicial=", Asmin1, Asmin2, Asmin3)

    print("\n")
    print("10-Se calcula la distorsión última y su desplazamiento")
    print("gama_u=",gama_u )
    print("Du =", gama_u*H)

    print("\n")
    print("11-Calculo de la ductilidad")
```

```
print("Mu_ductilidad =",Mu_ductilidad)
print("Mu_efectivo=",Mu_efectivo)

print("\n")
print("12-")
print("Demanda de desplazamiento de supervivencia elastica =",De_supervivencia_elastica)
print("Demanda de desplazamiento de supervivencia inelástica =",De_supervivencia_inelastica)

print("\n")
print("13-Calculo de demanda de desplazamiento efectivo en la columna")
print("Demanda de desplazamiento de supervivencia efectivo =",De_supervivencia)

print("\n")
print("14-Revisión de estabilidad")
if (Base/H) > (De_supervivencia_inelastica/H):
    print("Es estable", " (Base/H) > (De_supervivencia_inelastica/H)", " True")

print("\n")
print("15-Revisión de demanda dultima contra demanda de supervivencia")
if (Du/De_supervivencia) < 1:
    print("Du/De",Du/De_supervivencia)
    print("se aumenta la cuantia transversal")
else:
    print("Du/De",Du/De_supervivencia)

print("\n")
print("16-Revisión de la fuerza cortante")
print("s propuesta=",S_estribos)
print("Vsr=",Vsr)
print("Vy=",Vy)
print("Vy_efectivo=",Vy_efectivo)

if Vsr<Vy_efectivo:
    print("se debe aumentar la cuantia transversal, cambiando el detallado")
```

```

        print("pst_final=",pst_final)
    else:
        print("\n")
        print("17-Se hace el detallado")
        Area_acero = areas_varillas(numero_varillas,cantidad_varillas_longitudinales)*(0.01*0.01)
        pi_final = Area_acero/Ag
        print("D=",D)
        print("Recubrimiento",recubrimiento)
        print("Area acero longitudinal propuesto = ",Ag*pi_propuesto)
        print("Area acero longitudinal real= ",Area_acero)
        print("pi_final=",pi_final)
        print("pi_propuesta=",pi_propuesto)
        print("Area estribos",Av_estribos)
        print("Separación de estribos",s_estribos)
        print("pst_final=",pst_final)
        print("pst_propuesto=",pst)
        var = "Var"
        for i in range(len(numero_varillas)):
            var = str(cantidad_varillas_longitudinales[i]) + var + "#"+str(numero_varillas[i]) + "+"
        print(var)
        E = "E"
        for i in range(len(numero_varillas_transversales)):
            E = str(cantidad_varillas_transversales[i])+"E"+"#" +str(numero_varillas_transversales[i])
        print(E)
        proceso = "terminado"

print("\n")
print("Fase del proceso=",proceso)

if impresion == "si" and proceso == "terminado":
    vector = [Me,Ig,Ag,Ach
              ,Ke,Te,Tcr,Tcr_factor[1],w,

```

Te_efectivo,sci_efectivo,
D_ER_servicio,De,
gama,gama_max,gama_y,
Dy,De,(Dy/De)
,Asmin1,Asmin2,Asmin3
,gama_u,Du,
Mu_ductilidad,Mu_efectivo,
De_supervivencia_elastica,De_supervivencia_inelastica,
De_supervivencia,
(Du/De_supervivencia),
S_estribos,Vsr,Vy,

D,recubrimiento,(Ag*pi_propuesto),Area_acero,pi_final,pi_propuesto,Av_estribos,s_estribos,pst_final,pst,var,E
,Vy_efectivo]

```
doc = openpyxl.load_workbook(nombre_excel)
hoja = doc.get_sheet_by_name(hoja_impresion)
```

```
filas = [4,5,6,7,9,10,11,12,13,15,16,18,19,21,22,23,25,26,27,29,30,31,33,34,36,  
37,39,40,42,44,46,47,48,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,49]
```

```
Celdas = filas
for i in range(len(filas)):
    Celdas[i] = columnas[0]+str(filas[i])
for i in range(len(filas)):
    hoja[Celdas[i]] = vector[i]
doc.save(nombre_excel)
print("\n")
print("Impresion")
```

Anexo 3 Parámetros de diseño

Descripción de variables

L=Longitud de la columna en m
P= Carga axial en la columna en t
Me= Masa de la columna concentrada
I_g= Inercia gruesa de la columna en m⁴
A_g= Área gruesa en m²
A_{ch}= Área gruesa del concreto confinado
K_e= Rígidez lateral tomando en cuenta el área gruesa
T_e=Periodo estructural con la sección gruesa en s
T_{cr}= Periodo estructural con la sección agrietada en s
I_{cr}/I_g= Cociente de inercia agrietada y gruesa
w= Frecuencia angular
T_{efectivo}= Periodo efectivo tomando en cuenta la ISE en s
sci_ efectivo= Amortiguamiento efectivo de la estructura
D_{servicio}= Demanda sísmica de desplazamientos elásticos con sismo de servicio, m
D_{servicio_ef}= Demanda sísmica de desplazamientos elásticos con sismo de servicio del sistema equivalente con ISE, m
g=Distorsión demandada por el sismo de servicio
g_{max}= Distorsión de fluencia que se puede alcanzar con la cuantía máxima
g_y= Distorsión de fluencia que se puede alcanzar con la cuantía propuesta
D_y= Capacidad de desplazamiento lateral de la columna cuando se presenta la fluencia del acero longitudinal en m
D_e= Demanda de servicio en m
D_y/D_e
P_{st} inicial = Cuantía del acero transversal
g_u= Capacidad de distorsión última
D_u= Capacidad de deformación última en m
μ=Ductilidad
μ_{efectivo}= Ductilidad efectiva con ISE
D_{supervivencia_e}= Demanda sísmica de desplazamientos elásticos con sismo de sUPERVIVENCIA, m
D_{supervivencia_in}= Demanda de desplazamientos inelástico del sistema con ISE
D_{supervivencia_efectivo}= Demanda de desplazamientos inelástico efectivo
D_u/D_e= Cociente de demanda sísmica de desplazamientos contra capacidad de deformación última (D_u/D_{supervivencia_efectivo})
S_{propuesto}= Separación entre estribos
V_{sr}= Resistencia de cortante
V_y= Fuerza cortante de fluencia
V_{y_ efectivo} = Fuerza de cortante de fluencia con el sistema equivalente tomando en cuenta los efectos de ISE
D= Diámetro de columna en m
R= Recubrimiento en m
A_l propuesta= Área longitudinal de acero propuesta
A_l real=área longitudinal de acero real

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

ρ_{real} = Cuantía longitudinal de acero real
 $\rho_{propuesto}$ = Cuantía longitudinal de acero propuesta
 S = separación entre estribos en m
 $\rho_{st_{real}}$ = Cuantía transversal de acero real
 $\rho_{st_{propuesto}}$ = Cuantía transversal de acero propuesta
 Var = Varillas longitudinales
 E = Estribos

Parámetros de diseño

| Subducción | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.16 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.02 | 1.12 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.52 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.61 | 0.62 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 5.40 | 8.65 | 6.63 | 5.72 | 6.14 | 5.61 |
| Tefectivo= | 0.78 | 1.03 | 1.20 | 1.35 | 1.35 | 0.79 | 1.03 | 1.20 | 1.16 | 1.28 |
| sci_efectivo= | 0.088 | 0.077 | 0.072 | 0.069 | 0.073 | 0.078 | 0.071 | 0.067 | 0.075 | 0.072 |
| Dservicio= | 0.021 | 0.038 | 0.053 | 0.074 | 0.075 | 0.024 | 0.040 | 0.054 | 0.054 | 0.059 |
| Dservicio_ef= | 0.017 | 0.030 | 0.042 | 0.058 | 0.055 | 0.020 | 0.034 | 0.045 | 0.042 | 0.045 |
| g= | 0.0015 | 0.0027 | 0.0038 | 0.0053 | 0.0050 | 0.0022 | 0.0037 | 0.0050 | 0.0046 | 0.0050 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0068 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0071 | 0.0071 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.075 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.064 | 0.064 |
| De= | 0.017 | 0.030 | 0.042 | 0.058 | 0.055 | 0.020 | 0.034 | 0.045 | 0.042 | 0.045 |
| Dy/De= | 3.9 | 2.2 | 1.6 | 1.1 | 1.4 | 2.6 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.4 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.031 | 0.030 | 0.029 | 0.027 | 0.031 | 0.033 | 0.030 | 0.027 | 0.037 | 0.033 |
| Du= | 0.343 | 0.326 | 0.319 | 0.296 | 0.338 | 0.301 | 0.270 | 0.242 | 0.329 | 0.294 |
| Mu= | 5.28 | 5.01 | 4.91 | 4.55 | 4.54 | 5.80 | 5.20 | 4.66 | 5.15 | 4.61 |
| Mu_efectivo= | 6.39 | 6.07 | 5.96 | 5.53 | 5.79 | 6.69 | 6.00 | 5.38 | 6.38 | 5.69 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0533 | 0.0865 | 0.1347 | 0.1887 | 0.1900 | 0.0559 | 0.0899 | 0.1366 | 0.1236 | 0.1619 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0482 | 0.0738 | 0.1074 | 0.1432 | 0.1429 | 0.0500 | 0.0764 | 0.1105 | 0.0990 | 0.1258 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0316 | 0.0482 | 0.0695 | 0.0922 | 0.0826 | 0.0365 | 0.0555 | 0.0797 | 0.0618 | 0.0784 |
| Du/De= | 10.8 | 6.8 | 4.6 | 3.2 | 4.1 | 8.2 | 4.9 | 3.0 | 5.3 | 3.8 |
| Spropuesto= | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.22 | 0.16 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.14 | 0.14 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vsr= | 61.0 | 63.5 | 69.3 | 69.3 | 95.2 | 50.7 | 50.7 | 50.7 | 90.6 | 90.6 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 121.8 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 110.4 | 112.7 |
| Vy_efectivo | 60.1 | 62.0 | 63.5 | 65.0 | 89.9 | 46.8 | 48.8 | 50.5 | 85.3 | 86.7 |
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0490 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0472 | 0.0472 |
| Al real= | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0507 | 0.0194 | 0.0194 | 0.0194 | 0.0487 | 0.0487 |
| pi real= | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0189 | 0.0103 | 0.0103 | 0.0103 | 0.0258 | 0.0258 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0182 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0250 | 0.0250 |
| S= | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.22 | 0.16 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.14 | 0.14 |
| pst_real= | 0.0023 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0037 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0051 | 0.0051 |
| pst propuesto= | 0.0023 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0037 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0051 | 0.0051 |
| Var | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 25Var#16 | 17Var#12 | 17Var#12 | 17Var#12 | 19Var#18 | 19Var#18 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.189 | 0.049 | 0.072 | 0.102 | 0.102 | 0.102 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.5 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.3 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 3999 | 2857 | 4183 | 5924 | 5924 | 5924 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.92 | 0.74 | 0.44 | 0.49 | 0.49 | 0.55 | 0.61 |
| Tcr= | 0.81 | 0.86 | 1.00 | 1.12 | 0.91 | 0.69 | 0.74 | 0.68 | 0.71 | 0.77 |
| lcr/Ig= | 0.39 | 0.63 | 0.65 | 0.67 | 0.66 | 0.41 | 0.44 | 0.51 | 0.60 | 0.63 |
| w= | 7.71 | 7.32 | 6.28 | 5.62 | 6.87 | 9.06 | 8.47 | 9.20 | 8.83 | 8.13 |
| Tefectivo= | 0.86 | 0.93 | 1.09 | 1.22 | 1.06 | 0.73 | 0.81 | 0.78 | 0.83 | 0.90 |
| sci_efectivo= | 0.066 | 0.072 | 0.069 | 0.066 | 0.082 | 0.070 | 0.077 | 0.092 | 0.095 | 0.091 |
| Dservicio= | 0.038 | 0.036 | 0.051 | 0.053 | 0.043 | 0.017 | 0.027 | 0.021 | 0.026 | 0.032 |
| Dservicio_ef= | 0.034 | 0.031 | 0.043 | 0.045 | 0.032 | 0.015 | 0.023 | 0.016 | 0.020 | 0.023 |
| g= | 0.0048 | 0.0044 | 0.0061 | 0.0064 | 0.0045 | 0.0031 | 0.0045 | 0.0032 | 0.0039 | 0.0047 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0064 | 0.0064 | 0.0058 | 0.0054 | 0.0054 | 0.0054 |
| gy= | 0.0058 | 0.0072 | 0.0072 | 0.0072 | 0.0062 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0049 | 0.0049 |
| Dy= | 0.041 | 0.051 | 0.051 | 0.051 | 0.043 | 0.025 | 0.023 | 0.023 | 0.025 | 0.025 |
| De= | 0.034 | 0.031 | 0.043 | 0.045 | 0.032 | 0.015 | 0.023 | 0.016 | 0.020 | 0.023 |
| Dy/De= | 1.2 | 1.7 | 1.2 | 1.1 | 1.4 | 1.6 | 1.0 | 1.4 | 1.3 | 1.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.032 | 0.043 | 0.036 | 0.033 | 0.035 | 0.033 | 0.028 | 0.031 | 0.029 | 0.036 |
| Du= | 0.227 | 0.298 | 0.250 | 0.229 | 0.244 | 0.166 | 0.142 | 0.153 | 0.144 | 0.180 |
| Mu= | 5.59 | 5.88 | 4.93 | 4.53 | 5.63 | 6.69 | 6.31 | 6.74 | 5.89 | 7.36 |
| Mu_efectivo= | 6.11 | 6.76 | 5.66 | 5.20 | 7.23 | 7.35 | 7.28 | 8.47 | 7.62 | 9.69 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0591 | 0.0705 | 0.1103 | 0.1417 | 0.0985 | 0.0563 | 0.0564 | 0.0523 | 0.0532 | 0.0655 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0531 | 0.0610 | 0.0916 | 0.1147 | 0.0806 | 0.0498 | 0.0499 | 0.0461 | 0.0472 | 0.0555 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0437 | 0.0450 | 0.0675 | 0.0841 | 0.0466 | 0.0405 | 0.0366 | 0.0281 | 0.0269 | 0.0308 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Du/De= | 5.2 | 6.6 | 3.7 | 2.7 | 5.2 | 4.1 | 3.9 | 5.4 | 5.4 | 5.8 |
| Spropuesto= | 0.30 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 0.12 | 0.30 | 0.25 | 0.18 | 0.15 | 0.14 |
| Vsr= | 32.3 | 60.7 | 60.7 | 69.3 | 95.1 | 26.7 | 35.4 | 53.9 | 64.7 | 69.3 |
| Vy= | 34.4 | 69.1 | 71.2 | 73.4 | 115.0 | 29.1 | 41.3 | 68.5 | 87.7 | 90.9 |
| Vy_efectivo | 31.0 | 58.6 | 60.2 | 61.7 | 85.4 | 26.0 | 34.9 | 52.6 | 64.7 | 66.5 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0305 | 0.0305 | 0.0305 | 0.0416 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0170 | 0.0237 | 0.0237 |
| Al real= | 0.0114 | 0.0310 | 0.0310 | 0.0310 | 0.0426 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0171 | 0.0243 | 0.0243 |
| pi real= | 0.0101 | 0.0274 | 0.0274 | 0.0274 | 0.0276 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0151 | 0.0215 | 0.0215 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0150 | 0.0210 | 0.0210 |
| S= | 0.3 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 0.12 | 0.3 | 0.25 | 0.18 | 0.15 | 0.14 |
| pst_real= | 0.0031 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0067 | 0.0066 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0052 | 0.0063 | 0.0067 |
| pst propuesto= | 0.0031 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0067 | 0.0066 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0052 | 0.0063 | 0.0067 |
| Var | 10Var#12 | 20Var#14 | 20Var#14 | 20Var#14 | 21Var#16 | 10Var#10 | 12Var#10 | 11Var#14 | 12Var#16 | 12Var#16 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |
| Ig= | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.049 | 0.049 | | | | | |
| Ag= | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | | | | | |
| Ach | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | | | | | |
| Ke= | 3175 | 5417 | 8677 | 13226 | 13226 | | | | | |
| Te= | 0.42 | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.41 | | | | | |
| Tcr= | 0.58 | 0.57 | 0.56 | 0.51 | 0.52 | | | | | |
| Icr/Ig= | 0.53 | 0.57 | 0.53 | 0.53 | 0.62 | | | | | |
| w= | 10.82 | 10.98 | 11.32 | 12.41 | 12.12 | | | | | |
| Tefectivo= | 0.58 | 0.57 | 0.64 | 0.63 | 0.66 | | | | | |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.106 | 0.128 | 0.132 | | | | | |
| Dservicio= | 0.010 | 0.010 | 0.013 | 0.012 | 0.013 | | | | | |
| Dservicio_ef= | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | | | | | |
| g= | 0.0034 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0026 | 0.0028 | | | | | |
| gmax= | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0039 | | | | | |
| gy= | 0.0047 | 0.0041 | 0.0033 | 0.0030 | 0.0033 | | | | | |
| Dy= | 0.014 | 0.012 | 0.010 | 0.009 | 0.010 | | | | | |
| De= | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | | | | | |
| Dy/De= | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | | | | | |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | | | | | |
| gu= | 0.041 | 0.051 | 0.025 | 0.021 | 0.023 | | | | | |
| Du= | 0.123 | 0.152 | 0.075 | 0.064 | 0.069 | | | | | |
| Mu= | 8.76 | 12.33 | 7.54 | 7.15 | 7.08 | | | | | |
| Mu_efectivo= | 8.76 | 12.33 | 9.79 | 10.44 | 10.85 | | | | | |
| Dsupervivencia_e= | 0.0334 | 0.0328 | 0.0351 | 0.0317 | 0.0341 | | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------|---------|----------|---------|----------|----------|
| Dsupervivencia_in= | 0.0309 | 0.0298 | 0.0320 | 0.0291 | 0.0310 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0309 | 0.0298 | 0.0183 | 0.0130 | 0.0125 |
| Du/De= | 4.0 | 5.1 | 4.1 | 4.9 | 5.5 |
| Spropuesto= | 0.22 | 0.15 | 0.20 | 0.18 | 0.15 |
| Vsr= | 24.8 | 42.0 | 35.8 | 44.5 | 53.3 |
| Vy= | 23.4 | 37.8 | 45.4 | 63.1 | 80.6 |
| Vy_efectivo | 23.4 | 37.8 | 33.8 | 41.2 | 49.8 |
| D= | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0058 | 0.0077 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0118 |
| Al real= | 0.0061 | 0.0079 | 0.0063 | 0.0079 | 0.0114 |
| pi real= | 0.0158 | 0.0158 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0145 |
| pi propuesto= | 0.0150 | 0.0153 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0150 |
| S= | 0.22 | 0.15 | 0.2 | 0.18 | 0.15 |
| pst_real= | 0.0079 | 0.0099 | 0.0065 | 0.0064 | 0.0077 |
| pst propuesto= | 0.0079 | 0.0099 | 0.0065 | 0.0064 | 0.0077 |
| Var | 12Var#8 | 10Var#10 | 8Var#10 | 10Var#10 | 10Var#12 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |

Intraplaca

| | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.24 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.51 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 4.84 | 8.65 | 6.63 | 5.72 | 5.14 | 5.05 |
| Tefectivo= | 0.78 | 1.03 | 1.20 | 1.35 | 1.47 | 0.79 | 1.03 | 1.20 | 1.34 | 1.39 |
| sci_efectivo= | 0.088 | 0.077 | 0.072 | 0.069 | 0.066 | 0.078 | 0.071 | 0.067 | 0.065 | 0.066 |
| Dservicio= | 0.016 | 0.030 | 0.034 | 0.046 | 0.063 | 0.017 | 0.032 | 0.035 | 0.046 | 0.049 |
| Dservicio_ef= | 0.012 | 0.024 | 0.027 | 0.036 | 0.049 | 0.014 | 0.027 | 0.029 | 0.039 | 0.040 |
| g= | 0.0011 | 0.0022 | 0.0024 | 0.0032 | 0.0045 | 0.0016 | 0.0030 | 0.0032 | 0.0043 | 0.0044 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0063 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.057 |
| De= | 0.012 | 0.024 | 0.027 | 0.036 | 0.049 | 0.014 | 0.027 | 0.029 | 0.039 | 0.040 |
| Dy/De= | 5.2 | 2.7 | 2.4 | 1.8 | 1.3 | 3.7 | 1.9 | 1.8 | 1.3 | 1.4 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.031 | 0.030 | 0.029 | 0.027 | 0.025 | 0.033 | 0.030 | 0.027 | 0.024 | 0.027 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Du= | 0.343 | 0.326 | 0.319 | 0.296 | 0.272 | 0.301 | 0.270 | 0.242 | 0.220 | 0.239 |
| Mu= | 5.28 | 5.01 | 4.91 | 4.55 | 4.19 | 5.80 | 5.20 | 4.66 | 4.23 | 4.20 |
| Mu_efectivo= | 6.39 | 6.07 | 5.96 | 5.53 | 5.10 | 6.69 | 6.00 | 5.38 | 4.90 | 4.98 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0691 | 0.1752 | 0.4107 | 0.5594 | 0.5340 | 0.0703 | 0.1863 | 0.4312 | 0.5800 | 0.5672 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0487 | 0.0997 | 0.1823 | 0.2293 | 0.2283 | 0.0491 | 0.1045 | 0.1941 | 0.2448 | 0.2397 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0320 | 0.0651 | 0.1181 | 0.1476 | 0.1461 | 0.0359 | 0.0760 | 0.1401 | 0.1754 | 0.1629 |
| Du/De= | 10.7 | 5.0 | 2.7 | 2.0 | 1.9 | 8.4 | 3.6 | 1.7 | 1.3 | 1.5 |
| Spropuesto= | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.18 |
| Vsr= | 61.0 | 63.5 | 69.3 | 69.3 | 69.3 | 50.7 | 50.7 | 50.7 | 52.8 | 70.5 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 81.3 |
| Vy_efectivo | 60.1 | 62.0 | 63.5 | 65.0 | 66.5 | 46.8 | 48.8 | 50.5 | 52.2 | 65.5 |
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0284 |
| Al real= | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0284 |
| pi real= | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0150 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0150 |
| S= | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0023 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0030 | 0.0039 |
| pst propuesto= | 0.0023 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0030 | 0.0039 |
| Var | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 13Var#14 | 13Var#14 | 13Var#14 | 13Var#14 | 14Var#16 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.032 | 0.049 | 0.072 | 0.072 | 0.072 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 1874 | 2857 | 4183 | 4183 | 4183 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.92 | 1.01 | 0.55 | 0.59 | 0.58 | 0.66 | 0.73 |
| Tcr= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.11 | 1.21 | 0.84 | 0.88 | 0.85 | 0.84 | 0.91 |
| Icr/Ig= | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.68 | 0.70 | 0.42 | 0.45 | 0.47 | 0.61 | 0.64 |
| w= | 7.71 | 5.99 | 5.23 | 5.65 | 5.18 | 7.46 | 7.13 | 7.42 | 7.46 | 6.90 |
| Tefectivo= | 0.86 | 1.11 | 1.28 | 1.21 | 1.33 | 0.88 | 0.94 | 0.93 | 0.94 | 1.02 |
| sci_efectivo= | 0.066 | 0.062 | 0.061 | 0.066 | 0.065 | 0.061 | 0.066 | 0.074 | 0.079 | 0.077 |
| Dservicio= | 0.024 | 0.035 | 0.040 | 0.034 | 0.045 | 0.025 | 0.027 | 0.025 | 0.025 | 0.030 |
| Dservicio_ef= | 0.021 | 0.031 | 0.036 | 0.029 | 0.038 | 0.023 | 0.024 | 0.021 | 0.020 | 0.024 |
| g= | 0.0030 | 0.0045 | 0.0051 | 0.0041 | 0.0054 | 0.0047 | 0.0048 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0048 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0071 | 0.0064 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 |
| gy= | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0073 | 0.0073 | 0.0055 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0053 | 0.0053 |
| Dy= | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.051 | 0.051 | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.026 | 0.026 |
| De= | 0.021 | 0.031 | 0.036 | 0.029 | 0.038 | 0.023 | 0.024 | 0.021 | 0.020 | 0.024 |
| Dy/De= | 1.9 | 1.3 | 1.1 | 1.8 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.3 | 1.1 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.032 | 0.028 | 0.029 | 0.031 | 0.047 | 0.033 | 0.025 | 0.024 | 0.042 | 0.034 |
| Du= | 0.227 | 0.195 | 0.206 | 0.215 | 0.331 | 0.167 | 0.124 | 0.118 | 0.208 | 0.169 |
| Mu= | 5.59 | 4.80 | 5.08 | 4.22 | 6.52 | 6.06 | 4.99 | 5.22 | 7.87 | 6.41 |
| Mu_efectivo= | 6.11 | 5.25 | 5.60 | 4.84 | 7.60 | 6.46 | 5.50 | 6.03 | 9.60 | 7.82 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0857 | 0.2776 | 0.5734 | 0.4529 | 0.5805 | 0.0934 | 0.1245 | 0.1129 | 0.1187 | 0.1728 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0581 | 0.1438 | 0.2323 | 0.2077 | 0.2149 | 0.0615 | 0.0790 | 0.0719 | 0.0699 | 0.0943 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0478 | 0.1174 | 0.1872 | 0.1523 | 0.1543 | 0.0535 | 0.0635 | 0.0521 | 0.0458 | 0.0612 |
| Du/De= | 4.7 | 1.7 | 1.1 | 1.4 | 2.1 | 3.1 | 1.9 | 2.3 | 4.5 | 2.8 |
| Spropuesto= | 0.30 | 0.28 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.30 | 0.28 | 0.22 | 0.15 | 0.15 |
| Vsr= | 32.3 | 34.7 | 48.5 | 64.7 | 64.7 | 23.8 | 28.6 | 40.2 | 59.0 | 59.0 |
| Vy= | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 74.3 | 76.4 | 21.9 | 32.2 | 44.4 | 67.3 | 70.4 |
| Vy_efectivo | 31.0 | 33.1 | 35.1 | 62.4 | 63.9 | 20.3 | 28.6 | 37.2 | 53.8 | 55.8 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 0.9 | 1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0311 | 0.0311 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0188 | 0.0188 |
| Al real= | 0.0114 | 0.0114 | 0.0114 | 0.0324 | 0.0324 | 0.0066 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0202 | 0.0202 |
| pi real= | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0287 | 0.0287 | 0.0104 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0212 | 0.0212 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0275 | 0.0275 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0198 | 0.0198 |
| S= | 0.3 | 0.28 | 0.2 | 0.15 | 0.15 | 0.3 | 0.28 | 0.22 | 0.15 | 0.15 |
| pst_real= | 0.0031 | 0.0034 | 0.0047 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0047 | 0.0069 | 0.0069 |
| pst propuesto= | 0.0031 | 0.0034 | 0.0047 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0047 | 0.0069 | 0.0069 |
| Var | 10Var#12 | 10Var#12 | 10Var#12 | 16Var#16 | 16Var#16 | 13Var#8 | 10Var#10 | 12Var#10 | 13Var#14 | 13Var#14 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |
| Ig= | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.049 | 0.049 | | | | | |
| Ag= | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | | | | | |
| Ach | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | | | | | |
| Ke= | 3175 | 5417 | 8677 | 13226 | 13226 | | | | | |
| Te= | 0.42 | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.41 | | | | | |
| Tcr= | 0.62 | 0.60 | 0.56 | 0.51 | 0.54 | | | | | |
| Icr/Ig= | 0.47 | 0.51 | 0.53 | 0.53 | 0.57 | | | | | |
| w= | 10.21 | 10.41 | 11.32 | 12.41 | 11.63 | | | | | |
| Tefectivo= | 0.62 | 0.60 | 0.64 | 0.63 | 0.68 | | | | | |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.106 | 0.128 | 0.126 | | | | | |
| Dservicio= | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 0.011 | | | | | |
| Dservicio_ef= | 0.011 | 0.011 | 0.008 | 0.006 | 0.007 | | | | | |
| g= | 0.0037 | 0.0037 | 0.0026 | 0.0020 | 0.0023 | | | | | |
| gmax= | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0039 | | | | | |
| gy= | 0.0043 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0030 | 0.0030 | | | | | |
| Dy= | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | | | | | |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| De= | 0.011 | 0.011 | 0.008 | 0.006 | 0.007 |
| Dy/De= | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.3 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.032 | 0.036 | 0.025 | 0.021 | 0.018 |
| Du= | 0.095 | 0.109 | 0.075 | 0.064 | 0.055 |
| Mu= | 7.46 | 9.71 | 7.54 | 7.15 | 6.11 |
| Mu_efectivo= | 7.46 | 9.71 | 9.79 | 10.44 | 9.01 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0727 | 0.0674 | 0.0587 | 0.0529 | 0.0578 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0496 | 0.0455 | 0.0409 | 0.0374 | 0.0406 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0496 | 0.0455 | 0.0234 | 0.0167 | 0.0175 |
| Du/De= | 1.9 | 2.4 | 3.2 | 3.8 | 3.1 |
| Spropuesto= | 0.28 | 0.20 | 0.20 | 0.18 | 0.18 |
| Vsr= | 19.5 | 31.5 | 35.8 | 44.5 | 44.5 |
| Vy= | 19.0 | 30.9 | 45.4 | 63.1 | 67.9 |
| Vy_efectivo | 19.0 | 30.9 | 33.8 | 41.2 | 43.2 |
| D= | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0038 | 0.0050 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0079 |
| Al real= | 0.0040 | 0.0051 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0079 |
| pi real= | 0.0104 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.28 | 0.2 | 0.2 | 0.18 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0062 | 0.0075 | 0.0065 | 0.0064 | 0.0064 |
| pst propuesto= | 0.0062 | 0.0075 | 0.0065 | 0.0064 | 0.0064 |
| Var | 14Var#6 | 10Var#8 | 10Var#9 | 10Var#10 | 10Var#10 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cortical | | | | | | | | | | |
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.33 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.45 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 4.84 | 8.65 | 6.63 | 5.72 | 5.14 | 4.74 |
| Tefectivo= | 0.78 | 1.03 | 1.20 | 1.35 | 1.47 | 0.79 | 1.03 | 1.20 | 1.34 | 1.46 |
| sci_efectivo= | 0.088 | 0.077 | 0.072 | 0.069 | 0.066 | 0.078 | 0.071 | 0.067 | 0.065 | 0.063 |
| Dservicio= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 |
| Dservicio_ef= | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| g= | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 |
| De= | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 |
| Dy/De= | 91.4 | 44.4 | 29.0 | 22.5 | 18.7 | 67.0 | 32.6 | 21.4 | 16.9 | 14.2 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.035 | 0.033 | 0.031 | 0.029 | 0.026 | 0.033 | 0.029 | 0.028 | 0.024 | 0.023 |
| Du= | 0.388 | 0.362 | 0.338 | 0.314 | 0.290 | 0.294 | 0.264 | 0.248 | 0.220 | 0.204 |
| Mu= | 5.97 | 5.57 | 5.20 | 4.83 | 4.46 | 5.67 | 5.08 | 4.78 | 4.23 | 3.93 |
| Mu_efectivo= | 7.26 | 6.77 | 6.33 | 5.89 | 5.44 | 6.54 | 5.86 | 5.53 | 4.90 | 4.56 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0038 | 0.0076 | 0.0110 | 0.0143 | 0.0167 | 0.0040 | 0.0077 | 0.0112 | 0.0144 | 0.0167 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0039 | 0.0074 | 0.0105 | 0.0134 | 0.0156 | 0.0041 | 0.0077 | 0.0109 | 0.0140 | 0.0162 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0025 | 0.0048 | 0.0068 | 0.0086 | 0.0099 | 0.0030 | 0.0056 | 0.0078 | 0.0100 | 0.0115 |
| Du/De= | 153.6 | 74.7 | 49.8 | 36.4 | 29.1 | 97.3 | 46.9 | 31.6 | 22.0 | 17.7 |
| Spropuesto= | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.24 | 0.22 |
| Vsr= | 76.2 | 76.2 | 76.2 | 76.2 | 76.2 | 48.8 | 48.8 | 52.8 | 52.8 | 57.7 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 65.4 |
| Vy_efectivo | 60.1 | 62.0 | 63.5 | 65.0 | 66.5 | 46.8 | 48.8 | 50.5 | 52.2 | 53.9 |
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 |
| Al real= | 0.0263 | 0.0263 | 0.0263 | 0.0263 | 0.0263 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 |
| pi real= | 0.0098 | 0.0098 | 0.0098 | 0.0098 | 0.0098 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.24 | 0.22 |
| pst_real= | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0032 |
| pst propuesto= | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0032 |
| Var | 13Var#16 | 13Var#16 | 13Var#16 | 13Var#16 | 13Var#16 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.032 | 0.049 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 |
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 1491 | 1491 | 1491 | 1874 | 2857 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.92 | 1.01 | 0.61 | 0.82 | 0.97 | 0.98 | 0.88 |
| Tcr= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.32 | 1.42 | 0.94 | 1.17 | 1.31 | 1.30 | 1.16 |
| Icr/Ig= | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.48 | 0.51 | 0.43 | 0.49 | 0.55 | 0.58 | 0.57 |
| w= | 7.71 | 5.99 | 5.23 | 4.75 | 4.42 | 6.72 | 5.37 | 4.78 | 4.85 | 5.41 |
| Tefectivo= | 0.86 | 1.11 | 1.28 | 1.32 | 1.42 | 0.96 | 1.17 | 1.31 | 1.30 | 1.16 |
| sci_efectivo= | 0.066 | 0.062 | 0.061 | 0.050 | 0.050 | 0.058 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Dservicio= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Dservicio_ef= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| g= | 0.0001 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0003 | 0.0006 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0071 | 0.0064 |
| gy= | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0055 | 0.0050 |
| Dy= | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.028 | 0.025 |
| De= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Dy/De= | 38.9 | 20.7 | 13.2 | 10.7 | 9.3 | 17.9 | 10.3 | 7.8 | 7.5 | 9.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.032 | 0.028 | 0.024 | 0.021 | 0.036 | 0.035 | 0.021 | 0.028 | 0.027 | 0.027 |
| Du= | 0.227 | 0.195 | 0.166 | 0.148 | 0.250 | 0.177 | 0.107 | 0.142 | 0.137 | 0.137 |
| Mu= | 5.59 | 4.80 | 4.09 | 3.65 | 6.16 | 6.06 | 3.67 | 4.87 | 4.95 | 5.52 |
| Mu_efectivo= | 6.11 | 5.25 | 4.48 | 3.65 | 6.16 | 6.38 | 3.67 | 4.87 | 4.95 | 5.52 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0051 | 0.0091 | 0.0130 | 0.0147 | 0.0169 | 0.0067 | 0.0108 | 0.0144 | 0.0138 | 0.0106 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0052 | 0.0091 | 0.0130 | 0.0152 | 0.0155 | 0.0067 | 0.0116 | 0.0139 | 0.0134 | 0.0104 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0043 | 0.0074 | 0.0105 | 0.0152 | 0.0155 | 0.0060 | 0.0116 | 0.0139 | 0.0134 | 0.0104 |
| Du/De= | 53.0 | 26.2 | 15.8 | 9.7 | 16.1 | 29.6 | 9.2 | 10.2 | 10.2 | 13.2 |
| Spropuesto= | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.22 | 0.20 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.22 | 0.18 |
| Vsr= | 32.3 | 34.7 | 37.3 | 44.1 | 48.5 | 24.0 | 24.0 | 24.0 | 32.5 | 44.5 |
| Vy= | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 42.0 | 44.4 | 18.8 | 21.5 | 23.9 | 29.8 | 40.7 |
| Vy_efectivo | 31.0 | 33.1 | 35.1 | 42.0 | 44.4 | 17.7 | 21.5 | 23.9 | 29.8 | 40.7 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.9 | 1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0064 | 0.0079 |
| Al real= | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0079 |
| pi real= | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0112 | 0.0112 | 0.0112 | 0.0100 | 0.0101 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.3 | 0.28 | 0.26 | 0.22 | 0.2 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.22 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0031 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0047 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0059 | 0.0064 |
| pst propuesto= | 0.0031 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0047 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0059 | 0.0064 |
| Var | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 10Var#10 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |
| Ig= | 0.004 | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.049 | | | | | |
| Ag= | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | | | | | |
| Ach | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | | | | |
| Ke= | 1210 | 3175 | 5417 | 8677 | 13226 | | | | | |
| Te= | 0.68 | 0.56 | 0.51 | 0.46 | 0.41 | | | | | |
| Tcr= | 0.93 | 0.75 | 0.67 | 0.60 | 0.54 | | | | | |
| Icr/Ig= | 0.54 | 0.56 | 0.57 | 0.58 | 0.57 | | | | | |
| w= | 6.76 | 8.34 | 9.32 | 10.44 | 11.63 | | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|---------|---------|----------|
| Tefectivo= | 0.93 | 0.75 | 0.67 | 0.60 | 0.68 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.126 |
| Dservicio= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Dservicio_ef= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| g= | 0.0005 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 |
| gmax= | 0.0070 | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0039 |
| gy= | 0.0054 | 0.0043 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0030 |
| Dy= | 0.016 | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.009 |
| De= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| Dy/De= | 10.1 | 14.6 | 15.0 | 17.3 | 20.6 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.045 | 0.033 | 0.030 | 0.031 | 0.018 |
| Du= | 0.134 | 0.100 | 0.089 | 0.092 | 0.055 |
| Mu= | 8.22 | 7.82 | 7.93 | 9.30 | 6.11 |
| Mu_efectivo= | 8.22 | 7.82 | 7.93 | 9.30 | 9.01 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0062 | 0.0035 | 0.0031 | 0.0024 | 0.0029 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0060 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0030 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0060 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0013 |
| Du/De= | 22.2 | 27.6 | 27.5 | 37.1 | 42.1 |
| Spropuesto= | 0.30 | 0.22 | 0.18 | 0.14 | 0.18 |
| Vsr= | 13.9 | 24.8 | 35.0 | 51.1 | 44.5 |
| Vy= | 10.6 | 22.6 | 34.7 | 49.7 | 67.9 |
| Vy_efectivo | 10.6 | 22.6 | 34.7 | 49.7 | 43.2 |
| D= | 0.55 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0024 | 0.0038 | 0.0050 | 0.0064 | 0.0079 |
| Al real= | 0.0027 | 0.0041 | 0.0051 | 0.0066 | 0.0079 |
| pi real= | 0.0114 | 0.0105 | 0.0101 | 0.0104 | 0.0101 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.3 | 0.22 | 0.18 | 0.14 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0079 | 0.0079 | 0.0083 | 0.0093 | 0.0064 |
| pst propuesto= | 0.0079 | 0.0079 | 0.0083 | 0.0093 | 0.0064 |
| Var | 7Var#7 | 8Var#8 | 10Var#8 | 13Var#8 | 10Var#10 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |

Subducción empotrado

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.21 | 0.73 | 0.95 | 0.97 | 1.08 | 1.18 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.48 | 0.38 | 0.40 | 0.53 | 0.55 | 0.56 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 5.19 | 8.65 | 6.63 | 6.46 | 5.83 | 5.34 |
| Tefectivo= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.21 | 0.73 | 0.95 | 0.97 | 1.08 | 1.18 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.017 | 0.048 | 0.051 | 0.059 | 0.057 | 0.017 | 0.042 | 0.040 | 0.055 | 0.061 |
| Dservicio_ef= | 0.017 | 0.048 | 0.051 | 0.059 | 0.057 | 0.017 | 0.042 | 0.040 | 0.055 | 0.061 |
| g= | 0.0015 | 0.0043 | 0.0047 | 0.0053 | 0.0052 | 0.0019 | 0.0047 | 0.0044 | 0.0061 | 0.0067 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0065 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0067 | 0.0068 | 0.0068 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.071 | 0.052 | 0.052 | 0.060 | 0.061 | 0.061 |
| De= | 0.017 | 0.048 | 0.051 | 0.059 | 0.057 | 0.017 | 0.042 | 0.040 | 0.055 | 0.061 |
| Dy/De= | 3.9 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 3.0 | 1.2 | 1.5 | 1.1 | 1.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.035 | 0.035 | 0.033 | 0.031 | 0.034 | 0.036 | 0.035 | 0.040 | 0.041 | 0.037 |
| Du= | 0.388 | 0.386 | 0.361 | 0.336 | 0.372 | 0.325 | 0.311 | 0.364 | 0.373 | 0.335 |
| Mu= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.23 | 6.25 | 5.99 | 6.05 | 6.13 | 5.51 |
| Mu_efectivo= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.23 | 6.25 | 5.99 | 6.05 | 6.13 | 5.51 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0611 | 0.0725 | 0.1092 | 0.1367 | 0.1431 | 0.0648 | 0.0726 | 0.0779 | 0.1141 | 0.1314 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0549 | 0.0637 | 0.0912 | 0.1114 | 0.1154 | 0.0573 | 0.0636 | 0.0676 | 0.0931 | 0.1066 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0549 | 0.0637 | 0.0912 | 0.1114 | 0.1154 | 0.0573 | 0.0636 | 0.0676 | 0.0931 | 0.1066 |
| Du/De= | 7.1 | 6.1 | 4.0 | 3.0 | 3.2 | 5.7 | 4.9 | 5.4 | 4.0 | 3.1 |
| Spropuesto= | 0.20 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.14 | 0.22 | 0.20 | 0.14 | 0.12 | 0.12 |
| Vsr= | 76.2 | 84.7 | 84.7 | 84.7 | 108.8 | 57.7 | 63.4 | 90.6 | 105.7 | 105.7 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 107.4 | 55.4 | 58.1 | 89.5 | 94.7 | 97.1 |
| Vy_efectivo | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 107.4 | 55.4 | 58.1 | 89.5 | 94.7 | 97.1 |
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0403 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0360 | 0.0377 | 0.0377 |
| Al real= | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0405 | 0.0194 | 0.0194 | 0.0365 | 0.0388 | 0.0388 |
| pi real= | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0151 | 0.0103 | 0.0103 | 0.0193 | 0.0205 | 0.0205 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0150 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0191 | 0.0200 | 0.0200 |
| S= | 0.2 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.14 | 0.22 | 0.2 | 0.14 | 0.12 | 0.12 |
| pst_real= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0042 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0051 | 0.0059 | 0.0059 |
| pst propuesto= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0042 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0051 | 0.0059 | 0.0059 |
| Var | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 20Var#16 | 17Var#12 | 17Var#12 | 32Var#12 | 34Var#12 | 34Var#12 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.249 | 0.249 | 0.049 | 0.072 | 0.102 | 0.120 | 0.140 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.8 | 1.8 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 5270 | 5270 | 2857 | 4183 | 5924 | 6974 | 8159 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.59 | 0.65 | 0.44 | 0.49 | 0.49 | 0.51 | 0.52 |
| Tcr= | 0.81 | 0.89 | 1.04 | 0.74 | 0.81 | 0.69 | 0.74 | 0.73 | 0.74 | 0.71 |
| lcr/lg= | 0.39 | 0.58 | 0.61 | 0.63 | 0.64 | 0.41 | 0.44 | 0.45 | 0.47 | 0.54 |
| w= | 7.71 | 7.03 | 6.05 | 8.50 | 7.77 | 9.06 | 8.47 | 8.66 | 8.45 | 8.87 |
| Tefectivo= | 0.81 | 0.89 | 1.04 | 0.74 | 0.81 | 0.69 | 0.74 | 0.73 | 0.74 | 0.71 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.035 | 0.048 | 0.046 | 0.018 | 0.033 | 0.017 | 0.019 | 0.017 | 0.019 | 0.017 |
| Dservicio_ef= | 0.035 | 0.048 | 0.046 | 0.018 | 0.033 | 0.017 | 0.019 | 0.017 | 0.019 | 0.017 |
| g= | 0.0050 | 0.0068 | 0.0065 | 0.0026 | 0.0048 | 0.0033 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0034 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0060 | 0.0060 | 0.0064 | 0.0058 | 0.0054 | 0.0051 | 0.0049 |
| gy= | 0.0058 | 0.0070 | 0.0070 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0042 |
| Dy= | 0.041 | 0.049 | 0.049 | 0.040 | 0.040 | 0.025 | 0.023 | 0.021 | 0.020 | 0.021 |
| De= | 0.035 | 0.048 | 0.046 | 0.018 | 0.033 | 0.017 | 0.019 | 0.017 | 0.019 | 0.017 |
| Dy/De= | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 2.2 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.2 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.034 | 0.047 | 0.040 | 0.058 | 0.053 | 0.037 | 0.034 | 0.034 | 0.029 | 0.040 |
| Du= | 0.237 | 0.332 | 0.281 | 0.405 | 0.368 | 0.184 | 0.172 | 0.171 | 0.146 | 0.198 |
| Mu= | 5.84 | 6.77 | 5.73 | 10.06 | 9.13 | 7.40 | 7.60 | 8.24 | 7.35 | 9.44 |
| Mu_efectivo= | 5.84 | 6.77 | 5.73 | 10.06 | 9.13 | 7.40 | 7.60 | 8.24 | 7.35 | 9.44 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0625 | 0.0697 | 0.0945 | 0.0653 | 0.0628 | 0.0605 | 0.0652 | 0.0647 | 0.0651 | 0.0632 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0561 | 0.0605 | 0.0802 | 0.0552 | 0.0537 | 0.0529 | 0.0563 | 0.0556 | 0.0565 | 0.0539 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0561 | 0.0605 | 0.0802 | 0.0552 | 0.0537 | 0.0529 | 0.0563 | 0.0556 | 0.0565 | 0.0539 |
| Du/De= | 4.2 | 5.5 | 3.5 | 7.3 | 6.8 | 3.5 | 3.0 | 3.1 | 2.6 | 3.7 |
| Spropuesto= | 0.28 | 0.14 | 0.14 | 0.08 | 0.08 | 0.26 | 0.20 | 0.16 | 0.15 | 0.10 |
| Vsr= | 34.7 | 69.3 | 69.3 | 153.2 | 153.2 | 30.8 | 44.3 | 60.7 | 67.5 | 105.6 |
| Vy= | 34.4 | 61.8 | 64.1 | 133.6 | 136.3 | 29.1 | 41.3 | 55.3 | 65.0 | 92.2 |
| Vy_efectivo | 34.4 | 61.8 | 64.1 | 133.6 | 136.3 | 29.1 | 41.3 | 55.3 | 65.0 | 92.2 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.25 | 1.3 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0261 | 0.0261 | 0.0462 | 0.0462 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0113 | 0.0123 | 0.0199 |
| Al real= | 0.0114 | 0.0264 | 0.0264 | 0.0486 | 0.0486 | 0.0079 | 0.0095 | 0.0114 | 0.0114 | 0.0205 |
| pi real= | 0.0101 | 0.0233 | 0.0233 | 0.0275 | 0.0275 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0093 | 0.0155 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0231 | 0.0231 | 0.0262 | 0.0262 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0150 |
| S= | 0.28 | 0.14 | 0.14 | 0.08 | 0.08 | 0.26 | 0.2 | 0.16 | 0.15 | 0.1 |
| pst_real= | 0.0034 | 0.0067 | 0.0067 | 0.0092 | 0.0092 | 0.0044 | 0.0052 | 0.0059 | 0.0060 | 0.0086 |
| pst propuesto= | 0.0034 | 0.0067 | 0.0067 | 0.0092 | 0.0092 | 0.0044 | 0.0052 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0086 |
| Var | 10Var#12 | 17Var#14 | 17Var#14 | 24Var#16 | 24Var#16 | 10Var#10 | 12Var#10 | 10Var#12 | 10Var#12 | 18Var#12 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------|---------|----------|---------|----------|----------|
| Ig= | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.049 | 0.140 |
| Ag= | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.3 |
| Ach | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 1.1 |
| Ke= | 3175 | 5417 | 8677 | 13226 | 37774 |
| Te= | 0.42 | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.24 |
| Tcr= | 0.58 | 0.57 | 0.56 | 0.51 | 0.35 |
| Icr/Ig= | 0.53 | 0.56 | 0.53 | 0.53 | 0.48 |
| w= | 10.82 | 10.95 | 11.32 | 12.41 | 18.06 |
| Tefectivo= | 0.58 | 0.57 | 0.56 | 0.51 | 0.35 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.010 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.003 |
| Dservicio_ef= | 0.010 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.003 |
| g= | 0.0034 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0029 | 0.0012 |
| gmax= | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0030 |
| gy= | 0.0047 | 0.0041 | 0.0033 | 0.0030 | 0.0023 |
| Dy= | 0.014 | 0.012 | 0.010 | 0.009 | 0.007 |
| De= | 0.010 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.003 |
| Dy/De= | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 2.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.044 | 0.051 | 0.036 | 0.036 | 0.047 |
| Du= | 0.133 | 0.152 | 0.108 | 0.109 | 0.142 |
| Mu= | 9.50 | 12.39 | 10.85 | 12.19 | 20.58 |
| Mu_efectivo= | 9.50 | 12.39 | 10.85 | 12.19 | 20.58 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0334 | 0.0330 | 0.0309 | 0.0245 | 0.0100 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0307 | 0.0299 | 0.0283 | 0.0229 | 0.0097 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0307 | 0.0299 | 0.0283 | 0.0229 | 0.0097 |
| Du/De= | 4.3 | 5.1 | 3.8 | 4.8 | 14.5 |
| Spropuesto= | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.12 | 0.09 |
| Vsr= | 24.8 | 42.0 | 47.7 | 66.7 | 131.9 |
| Vy= | 23.4 | 37.4 | 45.4 | 63.1 | 125.8 |
| Vy_efectivo | 23.4 | 37.4 | 45.4 | 63.1 | 125.8 |
| D= | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1.3 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0058 | 0.0075 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0133 |
| Al real= | 0.0061 | 0.0079 | 0.0063 | 0.0079 | 0.0155 |
| pi real= | 0.0158 | 0.0158 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0117 |
| pi propuesto= | 0.0150 | 0.0150 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.22 | 0.15 | 0.15 | 0.12 | 0.08 |
| pst_real= | 0.0079 | 0.0099 | 0.0087 | 0.0096 | 0.0107 |
| pst propuesto= | 0.0086 | 0.0099 | 0.0087 | 0.0096 | 0.0100 |
| Var | 12Var#8 | 10Var#10 | 8Var#10 | 10Var#10 | 10Var#14 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |

| Intraplaca empotrado | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.33 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.45 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 4.84 | 8.65 | 6.63 | 5.72 | 5.14 | 4.74 |
| Tefectivo= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.33 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.016 | 0.030 | 0.040 | 0.039 | 0.047 | 0.016 | 0.031 | 0.039 | 0.035 | 0.050 |
| Dservicio_ef= | 0.016 | 0.030 | 0.040 | 0.039 | 0.047 | 0.016 | 0.031 | 0.039 | 0.035 | 0.050 |
| g= | 0.0014 | 0.0028 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0017 | 0.0035 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0056 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 |
| De= | 0.016 | 0.030 | 0.040 | 0.039 | 0.047 | 0.016 | 0.031 | 0.039 | 0.035 | 0.050 |
| Dy/De= | 4.2 | 2.1 | 1.6 | 1.7 | 1.4 | 3.3 | 1.7 | 1.3 | 1.5 | 1.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.035 | 0.035 | 0.033 | 0.031 | 0.031 | 0.036 | 0.035 | 0.031 | 0.028 | 0.031 |
| Du= | 0.388 | 0.386 | 0.361 | 0.336 | 0.338 | 0.325 | 0.311 | 0.281 | 0.250 | 0.278 |
| Mu= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.20 | 6.25 | 5.99 | 5.40 | 4.82 | 5.35 |
| Mu_efectivo= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.20 | 6.25 | 5.99 | 5.40 | 4.82 | 5.35 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0638 | 0.1224 | 0.2520 | 0.4645 | 0.6587 | 0.0661 | 0.1506 | 0.2805 | 0.5402 | 0.6705 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0462 | 0.0767 | 0.1323 | 0.2067 | 0.2609 | 0.0472 | 0.0895 | 0.1438 | 0.2346 | 0.2615 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0462 | 0.0767 | 0.1323 | 0.2067 | 0.2609 | 0.0472 | 0.0895 | 0.1438 | 0.2346 | 0.2615 |
| Du/De= | 8.4 | 5.0 | 2.7 | 1.6 | 1.3 | 6.9 | 3.5 | 2.0 | 1.1 | 1.1 |
| Spropuesto= | 0.20 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.16 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.15 |
| Vsr= | 76.2 | 84.7 | 84.7 | 84.7 | 95.2 | 57.7 | 63.4 | 63.4 | 63.4 | 84.6 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 65.4 |
| Vy_efectivo | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 65.4 |
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 |
| Al real= | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0284 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0202 |
| pi real= | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0107 | 0.0107 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.2 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.16 | 0.22 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.15 |
| pst_real= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0047 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| pst propuesto= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0047 |
| Var | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 14Var#16 | 13Var#14 | 13Var#14 | 13Var#14 | 13Var#14 | 13Var#14 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.032 | 0.049 | 0.072 | 0.072 | 0.140 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.3 |
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 1.1 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 1874 | 2857 | 4183 | 4183 | 8159 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.92 | 1.01 | 0.55 | 0.59 | 0.58 | 0.66 | 0.52 |
| Tcr= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.11 | 1.21 | 0.84 | 0.80 | 0.75 | 0.83 | 0.75 |
| Icr/Ig= | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.68 | 0.70 | 0.42 | 0.56 | 0.61 | 0.63 | 0.48 |
| w= | 7.71 | 5.99 | 5.23 | 5.65 | 5.18 | 7.46 | 7.89 | 8.43 | 7.59 | 8.39 |
| Tefectivo= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.11 | 1.21 | 0.84 | 0.80 | 0.75 | 0.83 | 0.75 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.022 | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.036 | 0.026 | 0.019 | 0.015 | 0.025 | 0.015 |
| Dservicio_ef= | 0.022 | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.036 | 0.026 | 0.019 | 0.015 | 0.025 | 0.015 |
| g= | 0.0032 | 0.0056 | 0.0054 | 0.0055 | 0.0052 | 0.0052 | 0.0039 | 0.0030 | 0.0049 | 0.0030 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0071 | 0.0064 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0049 |
| gy= | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0073 | 0.0073 | 0.0055 | 0.0057 | 0.0054 | 0.0054 | 0.0038 |
| Dy= | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.051 | 0.051 | 0.028 | 0.029 | 0.027 | 0.027 | 0.019 |
| De= | 0.022 | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.036 | 0.026 | 0.019 | 0.015 | 0.025 | 0.015 |
| Dy/De= | 1.8 | 1.0 | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 1.1 | 1.5 | 1.8 | 1.1 | 1.3 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.034 | 0.029 | 0.032 | 0.038 | 0.059 | 0.033 | 0.041 | 0.044 | 0.053 | 0.032 |
| Du= | 0.237 | 0.205 | 0.225 | 0.267 | 0.412 | 0.167 | 0.207 | 0.221 | 0.265 | 0.160 |
| Mu= | 5.84 | 5.06 | 5.56 | 5.25 | 8.12 | 6.06 | 7.22 | 8.18 | 9.81 | 8.35 |
| Mu_efectivo= | 5.84 | 5.06 | 5.56 | 5.25 | 8.12 | 6.06 | 7.22 | 8.18 | 9.81 | 8.35 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0745 | 0.2249 | 0.4925 | 0.3027 | 0.5194 | 0.0870 | 0.0703 | 0.0679 | 0.0808 | 0.0681 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0525 | 0.1249 | 0.2103 | 0.1529 | 0.1970 | 0.0588 | 0.0486 | 0.0466 | 0.0523 | 0.0466 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0525 | 0.1249 | 0.2103 | 0.1529 | 0.1970 | 0.0588 | 0.0486 | 0.0466 | 0.0523 | 0.0466 |
| Du/De= | 4.5 | 1.6 | 1.1 | 1.7 | 2.1 | 2.8 | 4.3 | 4.7 | 5.1 | 3.4 |
| Spropuesto= | 0.28 | 0.26 | 0.18 | 0.12 | 0.12 | 0.30 | 0.16 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Vsr= | 34.7 | 37.3 | 53.9 | 80.9 | 80.9 | 23.8 | 50.0 | 73.8 | 73.8 | 88.0 |
| Vy= | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 74.3 | 76.4 | 21.9 | 45.4 | 68.4 | 71.4 | 75.5 |
| Vy_efectivo | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 74.3 | 76.4 | 21.9 | 45.4 | 68.4 | 71.4 | 75.5 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 0.9 | 1 | 1.1 | 1.1 | 1.3 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0311 | 0.0311 | 0.0064 | 0.0146 | 0.0208 | 0.0208 | 0.0133 |
| Al real= | 0.0114 | 0.0114 | 0.0114 | 0.0324 | 0.0324 | 0.0066 | 0.0143 | 0.0206 | 0.0206 | 0.0155 |
| pi real= | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0287 | 0.0287 | 0.0104 | 0.0181 | 0.0217 | 0.0217 | 0.0117 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0275 | 0.0275 | 0.0100 | 0.0186 | 0.0219 | 0.0219 | 0.0100 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| S= | 0.28 | 0.26 | 0.18 | 0.12 | 0.12 | 0.3 | 0.16 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| pst_real= | 0.0034 | 0.0036 | 0.0052 | 0.0078 | 0.0078 | 0.0043 | 0.0072 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0072 |
| pst propuesto= | 0.0034 | 0.0036 | 0.0052 | 0.0078 | 0.0078 | 0.0043 | 0.0072 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0072 |
| Var | 10Var#12 | 10Var#12 | 10Var#12 | 16Var#16 | 16Var#16 | 13Var#8 | 18Var#10 | 26Var#10 | 26Var#10 | 10Var#14 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |
| Ig= | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.049 | 0.060 | | | | | |
| Ag= | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | | | | | |
| Ach | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | | | | | |
| Ke= | 3175 | 5417 | 8677 | 13226 | 16076 | | | | | |
| Te= | 0.42 | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.37 | | | | | |
| Tcr= | 0.62 | 0.60 | 0.56 | 0.51 | 0.50 | | | | | |
| Icr/Ig= | 0.47 | 0.51 | 0.53 | 0.53 | 0.55 | | | | | |
| w= | 10.21 | 10.41 | 11.32 | 12.41 | 12.60 | | | | | |
| Tefectivo= | 0.62 | 0.60 | 0.56 | 0.51 | 0.50 | | | | | |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | | | | | |
| Dservicio= | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | | | | | |
| Dservicio_ef= | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | | | | | |
| g= | 0.0037 | 0.0037 | 0.0030 | 0.0023 | 0.0022 | | | | | |
| gmax= | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0037 | | | | | |
| gy= | 0.0043 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0030 | 0.0028 | | | | | |
| Dy= | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | | | | | |
| De= | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | | | | | |
| Dy/De= | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | | | | | |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | | | | | |
| gu= | 0.032 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.034 | | | | | |
| Du= | 0.095 | 0.109 | 0.108 | 0.109 | 0.101 | | | | | |
| Mu= | 7.46 | 9.71 | 10.85 | 12.19 | 11.81 | | | | | |
| Mu_efectivo= | 7.46 | 9.71 | 10.85 | 12.19 | 11.81 | | | | | |
| Dsupervivencia_e= | 0.0727 | 0.0674 | 0.0598 | 0.0359 | 0.0334 | | | | | |
| Dsupervivencia_in= | 0.0496 | 0.0455 | 0.0412 | 0.0272 | 0.0256 | | | | | |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0496 | 0.0455 | 0.0412 | 0.0272 | 0.0256 | | | | | |
| Du/De= | 1.9 | 2.4 | 2.6 | 4.0 | 3.9 | | | | | |
| Spropuesto= | 0.28 | 0.20 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | | | | | |
| Vsr= | 19.5 | 31.5 | 47.7 | 66.7 | 76.6 | | | | | |
| Vy= | 19.0 | 30.9 | 45.4 | 63.1 | 75.8 | | | | | |
| Vy_efectivo | 19.0 | 30.9 | 45.4 | 63.1 | 75.8 | | | | | |
| D= | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1.05 | | | | | |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | | | | | |
| Al propuesta= | 0.0038 | 0.0050 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0087 | | | | | |
| Al real= | 0.0040 | 0.0051 | 0.0064 | 0.0079 | 0.0103 | | | | | |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| pi real= | 0.0104 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0119 | | | | | |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | | | | | |
| S= | 0.28 | 0.2 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | | | | | |
| pst_real= | 0.0062 | 0.0075 | 0.0087 | 0.0096 | 0.0099 | | | | | |
| pst propuesto= | 0.0062 | 0.0075 | 0.0087 | 0.0096 | 0.0099 | | | | | |
| Var | 14Var#6 | 10Var#8 | 10Var#9 | 10Var#10 | 13Var#10 | | | | | |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Cortical empotrado | | | | | | | | | | |
| L | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 |
| Ag= | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Ach | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| Ke= | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 3143 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 | 2827 |
| Te= | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.60 | 0.71 | 0.80 | 0.88 |
| Tcr= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.33 |
| Icr/Ig= | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.45 |
| w= | 9.04 | 6.88 | 5.90 | 5.28 | 4.84 | 8.65 | 6.63 | 5.72 | 5.14 | 4.74 |
| Tefectivo= | 0.70 | 0.91 | 1.06 | 1.19 | 1.30 | 0.73 | 0.95 | 1.10 | 1.22 | 1.33 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 |
| Dservicio_ef= | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 |
| g= | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0004 | 0.0004 |
| gmax= | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 |
| gy= | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 |
| Dy= | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.052 |
| De= | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 |
| Dy/De= | 82.7 | 42.7 | 31.3 | 21.7 | 17.6 | 62.3 | 30.3 | 23.8 | 16.0 | 13.7 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.035 | 0.035 | 0.033 | 0.031 | 0.031 | 0.036 | 0.032 | 0.031 | 0.028 | 0.027 |
| Du= | 0.388 | 0.386 | 0.361 | 0.336 | 0.338 | 0.325 | 0.292 | 0.281 | 0.250 | 0.239 |
| Mu= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.20 | 6.25 | 5.63 | 5.40 | 4.82 | 4.61 |
| Mu_efectivo= | 5.97 | 5.94 | 5.55 | 5.17 | 5.20 | 6.25 | 5.63 | 5.40 | 4.82 | 4.61 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0033 | 0.0059 | 0.0083 | 0.0113 | 0.0139 | 0.0035 | 0.0065 | 0.0090 | 0.0121 | 0.0147 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0035 | 0.0060 | 0.0083 | 0.0112 | 0.0134 | 0.0036 | 0.0066 | 0.0090 | 0.0120 | 0.0144 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0035 | 0.0060 | 0.0083 | 0.0112 | 0.0134 | 0.0036 | 0.0066 | 0.0090 | 0.0120 | 0.0144 |
| Du/De= | 109.8 | 64.3 | 43.5 | 30.1 | 25.3 | 89.1 | 44.2 | 31.2 | 20.9 | 16.6 |
| Spropuesto= | 0.20 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.16 | 0.22 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.18 |
| Vsr= | 76.2 | 84.7 | 84.7 | 84.7 | 95.2 | 57.7 | 63.4 | 63.4 | 63.4 | 70.5 |
| Vy= | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 65.4 |
| Vy_efectivo | 75.7 | 78.3 | 80.7 | 83.1 | 85.5 | 55.4 | 58.1 | 60.6 | 63.0 | 65.4 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D= | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0269 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 | 0.0189 |
| Al real= | 0.0243 | 0.0243 | 0.0243 | 0.0243 | 0.0243 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0187 |
| pi real= | 0.0090 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.2 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.16 | 0.22 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0039 |
| pst propuesto= | 0.0029 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0039 |
| Var | 12Var#16 | 12Var#16 | 12Var#16 | 12Var#16 | 12Var#16 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 | 14Var#13 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 |
| Ig= | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.102 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.032 | 0.049 |
| Ag= | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 |
| Ach | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| Ke= | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 2159 | 1491 | 1491 | 1491 | 1874 | 2857 |
| Te= | 0.51 | 0.68 | 0.81 | 0.92 | 1.01 | 0.61 | 0.82 | 0.97 | 0.98 | 0.88 |
| Tcr= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.32 | 1.42 | 0.94 | 1.17 | 1.31 | 1.30 | 1.16 |
| Icr/Ig= | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.48 | 0.51 | 0.43 | 0.49 | 0.55 | 0.58 | 0.57 |
| w= | 7.71 | 5.99 | 5.23 | 4.75 | 4.42 | 6.72 | 5.37 | 4.78 | 4.85 | 5.41 |
| Tefectivo= | 0.81 | 1.05 | 1.20 | 1.32 | 1.42 | 0.94 | 1.17 | 1.31 | 1.30 | 1.16 |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Dservicio= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Dservicio_ef= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| g= | 0.0001 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0003 | 0.0006 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 |
| gmax= | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0071 | 0.0064 |
| gy= | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0055 | 0.0050 |
| Dy= | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.028 | 0.025 |
| De= | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Dy/De= | 41.5 | 19.8 | 13.1 | 10.7 | 9.3 | 17.7 | 10.3 | 7.8 | 7.5 | 9.0 |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| gu= | 0.034 | 0.029 | 0.025 | 0.021 | 0.036 | 0.035 | 0.021 | 0.028 | 0.027 | 0.027 |
| Du= | 0.237 | 0.205 | 0.177 | 0.148 | 0.250 | 0.177 | 0.107 | 0.142 | 0.137 | 0.137 |
| Mu= | 5.84 | 5.06 | 4.36 | 3.65 | 6.16 | 6.06 | 3.67 | 4.87 | 4.95 | 5.52 |
| Mu_efectivo= | 5.84 | 5.06 | 4.36 | 3.65 | 6.16 | 6.06 | 3.67 | 4.87 | 4.95 | 5.52 |
| Dsupervivencia_e= | 0.0046 | 0.0080 | 0.0116 | 0.0147 | 0.0169 | 0.0063 | 0.0108 | 0.0144 | 0.0138 | 0.0106 |
| Dsupervivencia_in= | 0.0048 | 0.0082 | 0.0118 | 0.0152 | 0.0155 | 0.0063 | 0.0116 | 0.0139 | 0.0134 | 0.0104 |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0048 | 0.0082 | 0.0118 | 0.0152 | 0.0155 | 0.0063 | 0.0116 | 0.0139 | 0.0134 | 0.0104 |
| Du/De= | 49.0 | 25.0 | 15.0 | 9.7 | 16.1 | 27.9 | 9.2 | 10.2 | 10.2 | 13.2 |
| Spropuesto= | 0.28 | 0.26 | 0.24 | 0.22 | 0.20 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.22 | 0.18 |
| Vsr= | 34.7 | 37.3 | 40.4 | 44.1 | 48.5 | 24.0 | 24.0 | 24.0 | 32.5 | 44.5 |

Efectos de interacción suelo-estructura en puentes bajo diferentes fuentes sísmicas basado en conceptos de desplazamientos

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Vy= | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 42.0 | 44.4 | 18.8 | 21.5 | 23.9 | 29.8 | 40.7 |
| Vy_efectivo | 34.4 | 37.1 | 39.5 | 42.0 | 44.4 | 18.8 | 21.5 | 23.9 | 29.8 | 40.7 |
| D= | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.9 | 1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0064 | 0.0079 |
| Al real= | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0119 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0079 |
| pi real= | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0112 | 0.0112 | 0.0112 | 0.0100 | 0.0101 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.28 | 0.26 | 0.24 | 0.22 | 0.2 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.22 | 0.18 |
| pst_real= | 0.0034 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0047 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0059 | 0.0064 |
| pst propuesto= | 0.0034 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0047 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0059 | 0.0064 |
| Var | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 15Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 8Var#10 | 10Var#10 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |
| L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| P= | 140 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | |
| Me= | 14 | 25 | 36 | 46 | 56 | | | | | |
| Ig= | 0.004 | 0.012 | 0.020 | 0.032 | 0.072 | | | | | |
| Ag= | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 1.0 | | | | | |
| Ach | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | | | | | |
| Ke= | 1210 | 3175 | 5417 | 8677 | 19364 | | | | | |
| Te= | 0.68 | 0.56 | 0.51 | 0.46 | 0.34 | | | | | |
| Tcr= | 0.93 | 0.75 | 0.67 | 0.60 | 0.46 | | | | | |
| Icr/Ig= | 0.54 | 0.56 | 0.57 | 0.58 | 0.54 | | | | | |
| w= | 6.76 | 8.34 | 9.32 | 10.44 | 13.60 | | | | | |
| Tefectivo= | 0.93 | 0.75 | 0.67 | 0.60 | 0.46 | | | | | |
| sci_efectivo= | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | | | | | |
| Dservicio= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | | | | | |
| Dservicio_ef= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | | | | | |
| g= | 0.0005 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 | | | | | |
| gmax= | 0.0070 | 0.0055 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0035 | | | | | |
| gy= | 0.0054 | 0.0043 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0027 | | | | | |
| Dy= | 0.016 | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.008 | | | | | |
| De= | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | | | | | |
| Dy/De= | 10.1 | 14.6 | 15.0 | 17.3 | 25.2 | | | | | |
| Pst inicial | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | | | | | |
| gu= | 0.044 | 0.033 | 0.030 | 0.031 | 0.036 | | | | | |
| Du= | 0.133 | 0.100 | 0.089 | 0.092 | 0.107 | | | | | |
| Mu= | 8.21 | 7.82 | 7.93 | 9.30 | 13.14 | | | | | |
| Mu_efectivo= | 8.21 | 7.82 | 7.93 | 9.30 | 13.14 | | | | | |
| Dsupervivencia_e= | 0.0062 | 0.0035 | 0.0031 | 0.0024 | 0.0014 | | | | | |
| Dsupervivencia_in= | 0.0060 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0014 | | | | | |
| Dsupervivencia_efectivo= | 0.0060 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0014 | | | | | |
| Du/De= | 22.1 | 27.6 | 27.5 | 37.1 | 73.8 | | | | | |

| | | | | | |
|----------------|--------|--------|---------|---------|----------|
| Spropuesto= | 0.30 | 0.22 | 0.18 | 0.14 | 0.10 |
| Vsr= | 13.9 | 24.8 | 35.0 | 51.1 | 88.5 |
| Vy= | 10.6 | 22.6 | 34.7 | 49.7 | 84.3 |
| Vy_efectivo | 10.6 | 22.6 | 34.7 | 49.7 | 84.3 |
| D= | 0.55 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.1 |
| R= | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Al propuesta= | 0.0024 | 0.0038 | 0.0050 | 0.0064 | 0.0095 |
| Al real= | 0.0027 | 0.0041 | 0.0051 | 0.0066 | 0.0111 |
| pi real= | 0.0114 | 0.0105 | 0.0101 | 0.0104 | 0.0117 |
| pi propuesto= | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| S= | 0.3 | 0.22 | 0.18 | 0.14 | 0.1 |
| pst_real= | 0.0079 | 0.0079 | 0.0083 | 0.0093 | 0.0103 |
| pst propuesto= | 0.0079 | 0.0079 | 0.0083 | 0.0093 | 0.0100 |
| Var | 7Var#7 | 8Var#8 | 10Var#8 | 13Var#8 | 14Var#10 |
| E | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 | 2E#4 |