

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**  
**MENCIÓN EN CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES**



Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial  
mención en Carreteras, Puentes y Túneles

Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de  
puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas  
sísmicas en suelos arenosos

Autor: Bach. Félix Marín Guillén

Asesor: Dr. Andrés Valencia Gutiérrez

LIMA - PERÚ

2019

## **Dedicatorias**

Este trabajo está dedicado:

A mi papa Luchito, mama Dalilita y abuelita Ana que están al lado de Dios nuestro señor, quienes siempre me criaron, aconsejaron y guiaron por el derrotero de la ética y del correcto profesionalismo.

A mi esposa Jackieli por ser la mujer más inteligente que he conocido y a mi pequeño hijo Said quienes con su apoyo y cariño hicieron que cumpliera mis objetivos y metas.

A mi madre Flor, a mi padre Félix, a mis hermanas Tatiana y Verónica quienes con su preocupación y cariño me ayudaron a superarme.

Félix Marín.

## Índice general

<b>Caratula</b>	i
<b>Dedicatorias</b>	ii
<b>Índice general</b>	iii
<b>Índice de figuras</b>	v
<b>Índice de tablas</b>	vi
<b>Resumen</b>	vii
<b>Abstract</b>	viii
<b>Capítulo I: Planteamiento del estudio</b>	1
1.1. Introducción	1
1.2. Formulación del problema y justificación del estudio	2
1.2.1. Problema general	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. Antecedentes relacionados con el tema	3
1.4. Importancia del estudio	12
1.5. Objetivos generales y específicos	14
1.5.1. Objetivo general	14
1.5.2. Objetivos específicos	14
1.6. Limitación del estudio	15
<b>Capítulo II: Marco teórico</b>	16
2.1. Bases teóricas relacionadas con el tema	16
2.1.1. Interacción dinámica suelo-estructura	16
2.1.2. Conceptualización de la interacción suelo-estructura	18
2.1.3. Rigidez relativa suelo-estructura (esfuerzos sobre los elementos de cimentación)	20
2.1.4. Modelos de interacción suelo-estructura	24
2.1.5. Desempeño estructural de puentes	29
2.1.6. Peligro sísmico	41
2.2. Definición de términos usados	56
2.3. Hipótesis	57
2.3.1. Hipótesis general	57
2.3.2. Hipótesis específicas	57
2.4. Variables	58
2.4.1. Relación entre variables de estudio	58

<b>Capítulo III: Metodología de investigación</b>	60
3.1. Tipo y Método de Investigación	60
3.1.1. Por sus fuentes	60
3.1.2. Por sus alcances	60
3.1.3. Por la naturaleza del tratamiento de sus datos	61
3.2. Población de estudio	62
3.3. Diseño muestral	62
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	62
3.5. Procedimientos para la recolección de datos	63
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	63
<b>Capítulo IV: Resultados y análisis de resultados</b>	64
4.1. Resultados	64
4.1.1. Geometría del puente	65
4.1.2. Análisis estructural del puente	65
4.2. Análisis de resultados	73
<b>Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones</b>	77
5.1. Conclusiones	77
5.2. Recomendaciones	79
<b>Referencias bibliográficas</b>	80
<b>Anexos</b>	84

## Índice de figuras

Figura 1	Distribución de presiones en cimentaciones flexibles	21
Figura 2	Distribución de presiones en cimentaciones rígidas	22
Figura 3	Distribución de presiones en cimentaciones rígidas sobre arcillas	23
Figura 4	Distribución de presiones en cimentaciones rígidas sobre arenas	23
Figura 5	Componentes de un modelo discreto de elementos	31
Figura 6	(a) Elevación transversal y (b) Longitudinal; (c) Detalle; (d) Modelo de vigas y (e) Elementos de prop. equiv.; (f) Área equiv	33
Figura 7	(a) Análisis elástico lineal (b) Análisis no lineal	37
Figura 8	Pilas y Pilotes continuos (a) y (b) Prototipo global; (c) Modelo de los resortes del suelo; (d) Modelo equivalente	39
Figura 9	Esquema de metodología de cálculo de la peligrosidad probabilista	42
Figura 10	Fuentes Sismogénicas de subducción de Interfase e Intraplaca	45
Figura 11	Fuentes Sismogénicas de corteza superficial o continental	46
Figura 12	Diseño transeccional correlacional/causal	61
Figura 13	Vista longitudinal del puente	65
Figura 14	Numeración de nudos y elementos	65
Figura 15	Grados de libertad y modelo de masas concentradas	66
Figura 16	Modelo de masa concentrada con efecto del suelo de cimentación	66
Figura 17	Modelo de masas concentradas y efecto de interacción suelo-estructura	67
Figura 18	Zapata de cimentación para la pila central del puente	67
Figura 19	Modelo de cimentación con zapatas ISE	68
Figura 20	Diagrama de desplazamientos y velocidades	70
Figura 21	Conformación de la matriz de masas	70
Figura 22	Espectro de diseño del puente	71
Figura 23	Modelo de cimentación con pilotes	71
Figura 24	Espectro de diseño del puente-pilotes	73

## Índice de tablas

Tabla 1	Valores representativos de $n_h$ para arenas en Mpa/mm	28
Tabla 2	Tendencia de $Le$ para columnas en arcillas suaves y arenas	29
Tabla 3	Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas	50
Tabla 4	Coordenadas y profundidades de las fuentes de subducción de interfase	50
Tabla 5	Coordenadas y profundidades de las fuentes de subducción de intraplaca	51
Tabla 6	Coordenadas y profundidades de las Fuentes Continentales	52
Tabla 7	Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño	56
Tabla 8	Relación entre variables de estudio	58
Tabla 9	Cuadro de operacionalización de variables	59

## Resumen

El Perú se encuentra situado en el cinturón de fuego del pacífico, zona de mayor sismicidad en el mundo, por ende, se hace imprescindible lograr un mejor conocimiento sobre el comportamiento dinámico de las estructuras, como son los puentes y al ser el territorio peruano homogéneo desde el punto de vista geotécnico y geológico, debido a que las características del suelo varían de una zona a otra, cambiando también su sismicidad. Por tales motivos, la razón de la investigación se fundamenta en demostrar la importancia e influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta dinámica de puentes continuos de concreto armado debido a la acción de fuerzas laterales sísmicas sobre suelos arenosos semi densos, contribuyendo de esta manera a difundir la importancia del factor suelo y su implicancia en el futuro desempeño estructural de la infraestructura vial. Así mismo, debido a los escasos conocimientos obtenidos de trabajos de investigación sobre la influencia de estos factores, nos conduce a la necesidad de considerarlos en la respuesta sísmica de estructuras y por ende de incluirlo en las normas de diseño sismorresistente del país. Para tales fines en base a la aplicación de las metodologías de investigación indirecta, correlacional y cuantitativa, se empleó el modelo constitutivo del suelo de Mohr-Coulomb que permitió asegurar que el comportamiento del suelo no era lineal, sino más bien presenta un comportamiento tipo amortiguador con resorte y es inelástico y que al combinarlo con el modelo analítico de interacción suelo-estructura de Barkan-Savinov, a través del análisis de elementos finitos, mostraron que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en la determinación de los parámetros de cálculo de la estructura del puente, tales como desplazamiento lateral, fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima y momento flector, lo que permite establecer criterios de optimización de diseño a nivel de resistencia, rigidez o fatiga.

**Palabras claves:** Interacción suelo-estructura, Desempeño estructural, Cargas sísmicas.

## **Abstract**

Peru is located in the belt of fire of the Pacific, area of greatest seismicity in the world, therefore, it is essential to achieve a better understanding of the dynamic behavior of structures, such as bridges and being the Peruvian territory homogeneous from the geotechnical and geological point of view, because the characteristics of the soil vary from one area to another, also changing its seismicity. For these reasons, the reason for the investigation is based on demonstrating the importance and influence of the soil-structure interaction in the dynamic response of continuous reinforced concrete bridges due to the action of seismic lateral forces on semi-dense sandy soils, contributing to this way to spread the importance of the soil factor and its implication in the future structural performance of the road infrastructure. Likewise, due to the scarce knowledge obtained from research work on the influence of these factors, it leads us to the need to consider them in the seismic response of structures and therefore to include it in the seismic design standards of the country. For these purposes, based on the application of indirect, correlational and quantitative research methodologies, the Mohr-Coulomb soil constitutive model was used to ensure that the behavior of the soil was not linear, but rather it has a spring-like dampening behavior and is inelastic and that when combined with the soil interaction analytical model Barkan-Savinov structure, through the analysis of finite elements, showed that the flexibility of the foundation base directly influences the determination of the calculation parameters of the bridge structure, such as lateral displacement, maximum axial force, force maximum shear and bending moment, which allows to establish design optimization criteria at the level of resistance, rigidity or fatigue.

**Keywords:** Soil-structure interaction, Structural performance, Seismic loads.

# **CAPITULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Introducción**

El territorio peruano se encuentra ubicado sobre la placa tectónica sudamericana en la cual se produce el fenómeno de subducción con la placa tectónica de nazca, por ende, es afecto a eventos sísmicos intraplaca y continentales; por tal motivo, la presente investigación se centra en determinar la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) en la respuesta estructural sísmica de puentes, para el presente caso de condición continua y de concreto armado cimentado sobre suelos arenosos semi densos, razón por la cual, se considera la flexibilidad del suelo de fundación de modo que la estructura no esté empotrada en la base produciéndose un flujo de energía desde el suelo a la estructura y viceversa, fenómeno físico idealizado mediante la aplicación del método analítico de interacción suelo-

estructura de Barkan-Savinov, a través de un análisis de elementos finitos que contribuyeron a hallar el desplazamiento lateral, fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima y momento flector de la estructura del puente, lo que permitió establecer criterios de optimización de diseño.

## **1.2. Formulación del problema y justificación del estudio**

### **1.2.1. Problema general**

¿La interacción suelo-estructura influirá en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿El modelo constitutivo del suelo de Mohr-Coulomb, contribuirá a determinar el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos?

¿El modelo analítico de Barkan-Savinov contribuirá a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos?

¿Al aplicar el método de elementos finitos en base a los modelos de Mohr-Coulomb y de Barkan-Savinov, permitirá establecer la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos?

### **1.3. Antecedentes relacionados con el tema**

Históricamente no se ha tomado en cuenta los efectos de la interacción suelo estructura (ISE) en el diseño y análisis sísmico de puentes. La mayoría de los estudios de ISE en los últimos 25 años se dedicaron exclusivamente a edificios y estructuras relacionadas con centrales nucleares; Así mismo los análisis de la respuesta sísmica de puentes soportados por pilares y estructuras similares no han sido desarrollados en extenso por los investigadores.

Las investigaciones realizadas sobre el particular no lograron definir métodos y/o especificaciones que puedan ser anexados a los códigos que rigen el diseño y construcción de puentes en el Perú.

Las especificaciones más aceptadas están plasmadas en la guía de diseño de los EEUU a través de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ente que recomienda tres métodos de análisis estructural en puentes (coeficiente de respuesta sísmica elástico, análisis espectral de un modo y de varios modos vibración) que reconocen la importancia de las condiciones del suelo de fundación.

A continuación, se mencionan las investigaciones mas resaltantes relacionadas con el tema:

Mesa (2005), desarrolló en la universidad de Sevilla (España) una investigación relacionada al análisis del comportamiento de estructuras de puentes ante sollicitaciones sísmicas dependiendo de la tipología de la cimentación y la interacción suelo-estructura, en donde analizó en forma general el comportamiento de estructuras de puentes cuando se encuentran sometidas a sollicitaciones sísmicas, para lo cual evaluó la respuesta de un puente teórico sometido a una serie de

solicitaciones sísmicas, estudiando las posibles tipologías de cimentaciones y diferentes elementos que pueden disminuir la respuesta estructural, reduciéndose así los probables daños que se puedan generar en la estructura. También realizó modelizaciones de la interacción suelo-estructura con la finalidad de evaluar su comportamiento cuando está sometido a cargas dinámicas corroborando la diferencia en su respuesta cuando está sometido a cargas estáticas. Así mismo, utilizó métodos de contorno con el objetivo de modelar la interacción suelo-estructura y determinar la respuesta de estructuras de puentes sometidas a solicitaciones sísmicas, empleando elementos conectores tipo muelle y amortiguador, idealizados en el programa ABAQUS, basado en el método de los elementos finitos. Los resultados y conclusiones fundados en un análisis pseudoestático para el tipo de estructura y de terreno sobre la cual se cimienta el puente en estudio, ofrecen prácticamente los mismos efectos que un cálculo puramente dinámico, debido a que la variación de rigideces con la frecuencia no es significativa hasta una frecuencia de vibración de 10 Hz, mientras que las 6 primeras frecuencias de vibración del sistema son inferiores a 6 Hz.

Suescum (2016), desarrolló en la universidad de Sevilla (España) una investigación orientada a evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta dinámica de puentes de ferrocarril de luces cortas, planteándose como objetivo principal analizar la influencia que tiene en la respuesta dinámica de la estructura la inclusión de los escenarios de contorno, correspondientes a la condición de la interacción suelo-estructura (terreno y estribos) en puentes de ferrocarril de luces cortas, bajo las acciones que produce el paso de trenes de alta velocidad, y todo ello a través de modelos de elementos finitos. Se modelaron, distintos puentes

de ferrocarril tipo losa de luces cortas, variando tanto su luz, como las secciones transversales acordes a estas, a través de la realización de análisis dinámicos, con el objetivo de determinar los desplazamientos máximos y aceleraciones que se producen en el centro de su vano, ante las diferentes sollicitaciones que actúan sobre dichos puentes. Asimismo, el investigador hace hincapié en el estudio de la relevancia de la interacción suelo-estructura en la respuesta estructural, por ello se realizaron dos tipos de modelos, uno incluyendo el suelo (con variantes de distintos tipos de suelos, en función a su módulo de elasticidad) y otro sin incluirlo, con el propósito de comprobar la influencia que puede tener en los modelos completos, la inclusión de terrenos con distintas características. Se menciona también en la tesis, que los modelos de elementos de contorno tienen una mayor aplicación en el estudio de la interacción suelo-estructura, porque permiten realizar análisis más precisos, optando por modelos de elementos finitos, ya que sin duda su uso está mucho más extendido en el estudio de las estructuras, quedando los elementos de contorno más en el “ámbito” de la investigación aplicada. Las conclusiones refieren que la influencia es dependiente de la rigidez del terreno subyacente, afectando al coeficiente de impacto de manera poco previsible, ya que desplaza las velocidades de resonancia, y cambia el tipo de tren que la produce, lo cual es lógico, ya que se modifican las condiciones de rigidez del sistema. Sin embargo, la tendencia que existe es que la inclusión del terreno en los modelos que se estudian hace que a medida que el terreno sea más competente (terreno Tipo I definido por la NCSP-07), nos quedemos más del lado de la seguridad, obteniendo como resultados unos coeficientes de impacto y aceleraciones superiores a las que obtendríamos con un modelo habitual (tablero aislado).

Rojas (2009), desarrolló en la universidad técnica particular de Loja (Ecuador) una investigación relacionada al diseño directo basado en desplazamientos para puentes con interacción suelo-estructura, presentándose el método de diseño directo basado en desplazamientos (DDBD), como una alternativa de diseño sísmico, dando énfasis al uso de desplazamientos en lugar de fuerzas como una medida de la demanda sísmica y del daño en la estructura, para lo cual se plantearon como objetivo principal la implementación del método DDBD para puentes con interacción suelo-estructura, sustentados en la metodología equivalente propuesta por Suárez y Kowalsky (2007) del DDBD para pilas y pilotes prebarrenados; por tales motivos, el desempeño de cada una de las estructuras que resultaron de la aplicación del método de diseño, fue verificado mediante un análisis no lineal tiempo-historia y pushover, con el propósito de comprobar la capacidad de desplazamiento de las pilas. Las principales conclusiones del estudio se refieren al método de DDBD, manifestando que al ser un procedimiento directo lo convierte en un método de fácil aplicación y por considerar el amortiguamiento de las pilas y suelo (amortiguamiento viscoso equivalente) resulta más eficiente para diseñar, ya que toma en cuenta los efectos suelo-estructura, lo que no se da en el método AASHTO que es iterativo y no considera el amortiguamiento de las pilas y suelo; sin embargo se concluye también que la desventaja del método radica en las curvas de amortiguamiento y longitud efectiva que se utilizan en el cálculo, las cuales no son suficientes para representar toda la variedad de suelos, centrándose solamente en arenas de consistencia media y arcillas blandas.

Canavesio et al. (2011), desarrolló en la universidad de Tucumán (Argentina) una investigación referida a la interacción dinámica suelo-estructura en puentes, en

la cual se estipuló, que la interacción suelo-estructura, es la consideración de la flexibilidad del suelo de fundación de modo que la estructura no está empotrada en la base. Por lo tanto, existe un flujo de energía desde el suelo a la estructura y viceversa. El objetivo de la investigación se basó en la evaluación de diferentes condiciones de suelo y por ende diferentes propiedades de la fundación y cómo estos influyen en la respuesta estructural al relacionarlos con la excitación sísmica, lográndose distinguir dos factores que contribuyen al efecto: primero, la imposibilidad de la fundación de adoptar el movimiento no uniforme, variable espacialmente del suelo, llamada reducción media del movimiento debido a la fundación (ISE cinemática); y segundo, la acción y reacción entre el suelo y la fundación causan deformaciones en el suelo y movimiento en la fundación (ISE inercial). Asimismo, manifiestan que el aspecto clave de cualquier ISE dinámica es el cálculo de la relación fuerza desplazamiento de la interacción acoplada en los nodos localizados en la interfaz suelo-estructura. Esta rigidez dinámica del suelo semi infinito puede ser determinada precisamente mediante el MEC (Método de los Elementos de Contorno) o por sofisticados procedimientos MEF (Método de los Elementos Finitos). Con referencia a las ecuaciones de movimiento se conceptualizaron de naturaleza espacio temporal, resueltas en forma directa, en el dominio del tiempo, para sistemas reales, transformando las ecuaciones diferenciales del movimiento en ecuaciones algebraicas lineales mediante discretización de la variable tiempo. La conclusión principal estipula la posibilidad de obtener las ecuaciones dinámicas de movimiento de estructuras de puentes considerando la interacción suelo-estructura utilizando modelos simples para

representar el comportamiento del suelo y luego resolverlas en el dominio de la frecuencia.

Martínez (2014), desarrolló en la universidad de Sevilla (España) una investigación relacionada a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento dinámico de estructuras sometidas al paso de cargas móviles, motivo por el cual, se realizó un análisis equitativo del efecto que produce la interacción suelo-estructura en el comportamiento dinámico de estructuras sometidas al paso de cargas móviles, centrándose para ello en el paso de trenes de carga de alta velocidad sobre estructuras. Asimismo, se manifiesta que la respuesta en resonancia puede generar esfuerzos superiores a los admisibles del proyecto y alterar las condiciones de circulación del tráfico, al crear cambios inaceptables en la geometría de la vía, o vibraciones excesivas en las aeronaves. Las consideraciones analizadas refieren, que los principales factores que influyen en el comportamiento dinámico son: la frecuencia natural de la estructura, la distancia entre ejes, la velocidad del tráfico que atraviesa la estructura, el amortiguamiento de la estructura, el espaciamiento regular entre los soportes del tablero, las imperfecciones de las ruedas y las imperfecciones de la rodadura todas ellas idealizadas, bajo una metodología basada en el método de los elementos finitos con el objetivo de observar los efectos que producen la subestructura y el terreno adyacente en el análisis dinámico de la estructura. Las conclusiones de la investigación indican que la influencia es dependiente de la rigidez del terreno, afectando al coeficiente de impacto de forma poco previsible, ya que desplaza las velocidades de resonancia, lo cual es lógico ya que se modifican las condiciones de rigidez del sistema. Se

determinó también la clara influencia en la respuesta dinámica, debido a la inclusión de pilas, estribos y terreno, en el modelo estructural de análisis.

Herrera (2013), desarrolló en la Universidad Nacional de Colombia, una investigación (empleando la metodología de diseño de experimentos) referida a la interacción dinámica suelo estructura (IDSE) de edificaciones construidas en ladera, considerando un modelo no lineal del suelo y elastoplástico para las estructuras, en un espacio bidimensional por medio del software de elementos finitos PLAXIS 2010, donde se analizó la interacción de los factores tales como: el contenido frecuencial del sismo, velocidad de onda de corte promedio del estrato de suelo, ángulo de inclinación de la ladera, periodo característico de la estructura y la posición de los edificios en el desarrollo de la ladera; Por tal motivo evaluaron dos variables respuesta de los edificios construidos en ladera, la primera consistente en la relación de la cortante basal obtenida para cada edificio en ladera, con su respectiva cortante basal obtenida en condiciones topográficas planas y la segunda fue la relación del desplazamiento máximo experimentado en el techo de los edificios localizados en la ladera, con su respectivo desplazamiento obtenido en condiciones topográficas planas. Las conclusiones de la investigación en lo concerniente a la IDSE refieren que los edificios experimentaron menor aceleración a medida que disminuye la rigidez de los perfiles geotécnicos y aumenta la inclinación de las laderas, sin embargo, aumentaron los desplazamientos en el techo, evidenciándose no solo desplazamientos horizontales asociados a efectos traslacionales sino también a incrementos de desplazamientos horizontales asociados a efectos rotacionales.

Valderrama y Meza (2014), desarrollaron en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, una investigación que tuvo como objetivo principal demostrar que los esfuerzos internos obtenidos a partir de modelaciones que consideran la interacción suelo-estructura, son menores a los que se obtienen de modelaciones que consideran la base empotrada, tomando como punto de partida el modelo dinámico publicado por D.D. Barkan – O.A. Savinov. Para la obtención de una muestra significativa tomaron en cuenta la fuerza axial, fuerza cortante y momento flector de doce modelaciones de una edificación bajo diferentes condiciones relacionadas con cambios de zona sísmica, de porcentaje de amortiguación del concreto armado y de tipos de análisis sísmicos. Las principales conclusiones refieren, que en los análisis en donde se consideró la interacción suelo-estructura, los desplazamientos de los entrepisos y las fuerzas internas están en función de los coeficientes de rigidez y estos a su vez, en función de las características del edificio, del suelo de fundación y de las características geométricas de las zapatas; así mismo se demostró que con la implementación de la ISE en los diferentes modelos analizados, los esfuerzos internos de una edificación aporricada con zapatas aisladas se ven disminuidos con respecto a los modelos que no consideran la interacción suelo-estructura (bases empotradas).

Fernández (2013), desarrolló una investigación vinculada a evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta dinámica de las estructuras, para lo cual analizó la importancia de la IDSE en la respuesta estructural, concluyendo que la misma está definida por el contraste que existe entre la rigidez del sistema suelo-cimentación y la rigidez de la estructura, por lo que en estructuras rígidas (como es el caso de estructuras de muros de mampostería o

concreto, o de pórticos de concreto de sección considerable) el efecto será más pronunciado. Asimismo, comprobó que uno de los conceptos íntimamente ligados con la interacción inercial es la impedancia, que hace referencia a la rigidez dinámica del sistema suelo-cimentación, considerándola sin masa y dado que la rigidez es la relación que existe entre la fuerza aplicada y el desplazamiento producido, la función de impedancia o rigidez dinámica se refiere a la fuerza (o momento) necesaria para producir un desplazamiento (o rotación) unitario en la cimentación.

Rodríguez (2005), desarrolló una investigación concerniente al análisis de la interacción suelo-estructura para refuerzo de suelos fisurados, presentando los resultados de un análisis de interacción suelo estructura realizado para el diseño de una cimentación en arcillas blandas fisuradas de la Sabana de Bogotá. El sistema de cimentación analizado consistió en una estabilización y en un refuerzo del suelo mediante inclusiones de suelo con cemento y cal, para lo cual se evaluó el efecto de las inclusiones sobre la capacidad portante y las deformaciones, teniendo en cuenta la presencia de grietas abiertas y fisuras presentes en el suelo debido a la desecación. Los análisis se hicieron mediante un modelo axisimétrico de elementos finitos para modelar el suelo y las inclusiones rígidas. Los datos para los análisis se obtuvieron del estudio de suelos realizado, como parte del proyecto para una subestación eléctrica de alta capacidad. Los análisis de interacción suelo-estructura realizados le permitieron al investigador diseñar un sistema de refuerzo para suelos fisurados mediante inclusiones rígidas. El método permitió determinar el espaciamiento, la longitud y la resistencia óptima. Los resultados de los análisis ayudaron a entender

el funcionamiento del sistema y su efecto sobre el comportamiento de los suelos, a partir de lo cual se pueden tomar decisiones de ingeniería de diseño y construcción.

Taylor (2007), desarrolló una investigación, cuyo objetivo principal era analizar un modelo de elementos finitos que incluya la variación espacial del movimiento sísmico en puentes, por tal motivo se calibró un modelo del puente marga en Chile, con múltiples entradas de aceleración en los apoyos, evaluándose también la interacción suelo-estructura, por ser de relevancia, puesto que filtra las altas frecuencias que se encuentran en la zona, reduciendo las aceleraciones durante el movimiento brusco del sismo; posteriormente, para reproducir fielmente el comportamiento del puente fue necesario considerar la ISE ya que se demostró que con la señal sísmica de la zona, no se obtiene la respuesta real de la estructura ante un sismo de magnitud moderada.

El pequeño número de puentes estudiados considerando ISE puede ser atribuido de antemano a la complejidad del problema físico y a la falta de una aproximación de diseño de fácil uso que tenga en cuenta su influencia.

Recientes estudios experimentales y analíticos han identificado el importante rol que la ISE puede jugar durante la excitación sísmica de las estructuras y han demostrado la necesidad de incorporarla en el diseño de una amplia gama de tipos de puentes.

#### **1.4. Importancia del estudio**

Al ser el Perú un país altamente sísmico es de importancia evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) en la respuesta estructural de puentes, la cual está definida por el contraste que existe entre la rigidez del sistema suelo-cimentación y la rigidez de la estructura propiamente, por lo que en estructuras

rígidas el efecto será más pronunciado. Básicamente puede señalarse que la ISE es la consideración de la flexibilidad del suelo de fundación de modo que la estructura no está empotrada en la base. Por lo tanto, existe un flujo de energía desde el suelo a la estructura y viceversa.

Lo que plantea la ISE es tomar en cuenta las propiedades elásticas del suelo, es decir, el suelo no es infinitamente rígido, como suele plantearse en la mayoría de análisis, sino que tiene cierto grado de amortiguamiento y absorbe parte de la energía generada por el sismo. Esto va a ocasionar que menores cantidades de energía lleguen a la superestructura, por ende, los elementos estructurales soportarán menores fuerzas internas en comparación a la que se obtiene del cálculo común sin ISE. Otro efecto de la ISE es el aumento de los desplazamientos generados por el sismo, ya que estos van a comenzar desde la base.

Así mismo la ISE consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad del sistema ante la acción de cargas sísmicas. La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en las cercanías de la cimentación. Pese a que ambos fenómenos se relacionan entre sí, para propósitos de diseño y análisis es conveniente tenerlos en cuenta por separado en razón a que facilita su evaluación. En particular, las amplificaciones dinámicas del subsuelo adquieren valores extraordinariamente altos cuando los periodos predominantes del sismo y el suelo son similares. De igual forma, la interacción puede ocasionar considerables incrementos o reducciones de la respuesta estructural, dependiendo de la relación entre los periodos fundamentales de la estructura y el suelo. Específicamente,

cuando el periodo efectivo (propiedad dinámica) de la ISE se acerca a la dominante del suelo tiene lugar el fenómeno de resonancia, haciendo que la respuesta estructural sea excepcionalmente elevada.

Por lo expuesto es relevante evaluar el comportamiento estructural de puentes considerando la interacción suelo-estructura, especialmente si recientes estudios experimentales y analíticos han identificado el importante rol que puede jugar este fenómeno durante la excitación dinámica y han demostrado la necesidad de incorporarla en los códigos peruanos (manual del MTC) que rigen el diseño de puentes, siendo uno de sus objetivos lograr diseños más económicos producto de las reducciones en las características y propiedades de la estructura.

## **1.5. Objetivos generales y específicos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos, con la finalidad de establecer criterios de optimización de diseño, mediante la aplicación del método de elementos finitos.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

Aplicar el modelo constitutivo del suelo de Morh-Coulomb a fin de determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

Aplicar el modelo analítico de Barkan-Savinov, con la finalidad de determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

Aplicar el método de elementos finitos en base a los modelos de Mohr-Coulomb y de Barkan-Savinov, a fin de establecer la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

#### **1.6. Limitación del estudio**

La limitación más importante está referida a tomar en consideración las diferentes condiciones y propiedades del suelo de fundación, debido a los distintos efectos que estos ocasionan en la respuesta estructural de los puentes, y que al analizarlos conjuntamente con la excitación dinámica se distinguen dos factores a evaluar en la investigación que contribuyen al efecto: primero, la imposibilidad de la fundación de adoptar el movimiento no uniforme, y segundo, la acción y reacción entre el suelo y la cimentación que ocasionan deformaciones en el suelo y movimiento en la subestructura. Por tales motivos se planteará un modelo analítico propio de un suelo arenoso (semi denso) y elastoplástico (propias de estructuras de concreto armado) como premisas para el desarrollo de la tesis.

Así mismo, otra limitación de la investigación esta relacionado a la exigua información a nivel de tesis, artículos o documentos técnicos referidos a la interacción suelo-estructura en puentes, razón por la cual se ha tomado en consideración la mayor parte de estas investigaciones desde 1989 a la fecha.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Bases teóricas relacionadas con el tema**

##### **2.1.1. Interacción dinámica suelo-estructura**

La interacción dinámica suelo-estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad del sistema ante la excitación sísmica. La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, como por ejemplo, el periodo fundamental, así como las características del movimiento del suelo en la vecindad de la cimentación (Avilés et al., 2004).

El alargamiento del periodo fundamental de vibración, el incremento o reducción de la demanda de la ductilidad estructural, son producidos por la interacción inercial debido fundamentalmente a la inercia y elasticidad del

sistema acoplado. Por otra parte, la interacción cinemática reduce la traslación de la cimentación e induce torsión y cabeceo en ella, a la vez que filtra los componentes de alta frecuencia de la excitación sísmica, debido a la rigidez y geometría de la cimentación (Jaramillo et al., 2004).

La interacción modifica los parámetros dinámicos de la estructura, así como las características del movimiento del terreno en la vecindad de la cimentación. Estas variaciones pueden producir reducciones en el cortante basal, en las derivas de entrepiso y en los momentos de volteo calculado para estructuras supuestas con base indeformable, he incrementará los desplazamientos laterales. Cuando se logran estas reducciones, se pueden lograr diseños más económicos, Pero hay situaciones en las que tal circunstancia no se presenta y hay aspectos en los que el efecto de interacción es desfavorable (Soriano, 1989).

Existen algunos referentes respecto a la evaluación de la modificación de los espectros respuesta en campo libre debido a presencia de estructuras, entre los que se destaca los adelantados por Soriano (1989). A nivel de tesis de maestría en ingeniería geotécnica en Colombia Vergara (2008) y Olarte (2009) coinciden en concluir que los espectros de respuesta en campo libre sufren modificaciones importantes debido a la presencia de estructuras, que algunas ocasiones puede implicar amplificaciones y otras de amplificaciones, dependiendo de los sistemas acoplados suelo estructura y de la señal sísmica.

Para estudiar la interacción entre la estructura y el suelo se necesita el uso de softwares por computadora capaces de llevar a cabo este tipo de análisis en una forma más ágil y precisa, tomando en cuenta que para

desarrollar un buen análisis es necesario definir la ecuación constitutiva que trate de representar las condiciones reales del terreno en estudio. El propósito principal de la interacción suelo-estructura es llevar a cabo un análisis estructural tomando en cuenta el efecto de la rigidez del terreno de cimentación.

### **2.1.2. Conceptualización de la interacción suelo-estructura**

La masa de suelo, al recibir cargas (esfuerzos) que son transmitidas por la cimentación, tiende a deformarse en una o en varias de sus capas (estratos), dependiendo de la compresión y las propiedades del mismo, las cuales pueden variar con el tiempo o con algunos factores como lo son: la variación del volumen de vacíos como consecuencia de la consolidación del suelo, el desplazamiento y la disminución de la distancia relativa entre las partículas y produciendo, de forma acumulada con los demás estratos, un asentamiento en la superficie de contacto entre la cimentación y la masa del suelo.

“Los cimientos juegan un papel muy importante dentro de la construcción debido a que distribuyen las cargas de la estructura hacia el suelo y los materiales que lo constituyen deben tener la capacidad suficiente para soportarlas sin sufrir deformaciones excesivas” (Canales, 2005).

A partir de esto, se puede decir que la interacción suelo-estructura es aquella parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando éstas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. La influencia de la estructura puede ser en condiciones estáticas, lo cual es tratado por la interacción estática suelo-estructura, o

puede ser en condiciones dinámicas, lo cual cae en el campo de la interacción dinámica suelo-estructura.

“En la interfaz de la estructura de cimentación y el suelo se originan desplazamientos debido a las cargas que transmite la cimentación dando lugar a desplazamientos totales y diferenciales. Los desplazamientos diferenciales de la estructura deberán ser iguales a los originados en la superficie de apoyo de la cimentación. Así pues, la estructura de la cimentación junto con las cargas que obran sobre ella y las reacciones que se provocan en el suelo se sujetará a una determinada configuración, igual a la que el suelo adoptará debido a las reacciones que éste aporta a la estructura de cimentación para su equilibrio. La configuración de esfuerzos y deformaciones en la superficie de contacto dependerá de la rigidez de la estructura de la cimentación, de la rigidez del subsuelo y de la distribución de cargas que se apliquen sobre la estructura de la cimentación” (Pérez, 2012).

“La interacción entre la estructura de cimentación y el suelo consistirá en encontrar un sistema de reacciones que, aplicadas simultáneamente a la estructura de cimentación y a la masa del suelo, produzcan la misma configuración de desplazamientos diferenciales entre los dos elementos. Para lograr lo anterior, será necesario basarse por un lado en las leyes físicas que rigen el comportamiento de la masa del suelo y por el otro en los procedimientos nominales de cálculo estructural en la determinación de fuerzas y deformaciones, tomando en cuenta las propiedades mecánicas del material en el que será construida la estructura de cimentación” (Apuntes ingeniería civil, 2018).

En términos generales, el procedimiento de cálculo para interacción suelo-estructura consiste en tres pasos:

- a) Se calculan los desplazamientos de la estructura. El cálculo de los desplazamientos provocado por la acción de cargas sobre la estructura se realiza utilizando el método de rigidez.
- b) Se calculan los desplazamientos del suelo de cimentación. Estos se calculan en función de las cargas que actúan sobre él (por tercera ley de Newton, a toda reacción corresponde una reacción igual en magnitud y de sentido contrario).
- c) Una vez generado el sistema de ecuaciones entre estructura y suelo se establece la compatibilidad de deformaciones entre ambos medios, resolviéndose así el problema al obtener las deformaciones del suelo y reacciones sobre la estructura.

### **2.1.3. Rigidez relativa suelo-estructura (esfuerzos sobre los elementos de cimentación)**

Según Pérez (2012), la transmisión de las cargas de la superestructura a la masa de suelo plantea un complejo problema de interacción entre los tres elementos implicados: estructura, cimentación y masa de suelo. Los principales factores a considerar en dicho proceso de interacción serán el tipo y características de la masa de suelo, la forma y dimensiones de la cimentación y la rigidez relativa suelo-estructura y suelo-cimentación.

Además de la rigidez de la cimentación, la propia rigidez de la estructura a cimentar inducirá también restricciones al movimiento y a la respuesta asociada de la masa de suelo. En el caso más general, cuando el

suelo se tienda a asentar por efecto de la presión aplicada, la estructura, en función de su rigidez, redistribuirá sus esfuerzos, modificando a su vez las sollicitaciones sobre los cimientos y el suelo. La situación de equilibrio final dependerá por tanto de la rigidez relativa del conjunto suelo-cimiento estructura.

Para ilustrar el fenómeno de la interacción se tomó como referencia lo estipulado por Pérez (2012), donde la Figura 1 muestra el caso sencillo de un cimiento infinitamente flexible, apoyado directamente sobre la superficie de un terreno horizontal, sobre la que se aplica una presión uniforme. Por efecto de esta presión, el terreno y el cimiento sufrirán un asentamiento, que resultará mayor en el centro que en los extremos y no se limitará al área cargada, si no que se extenderá a ambos lados de ella hasta una cierta distancia (influenciada por dichas acciones). Por ser infinitamente flexible, el cimiento no será capaz de soportar momentos flexionantes y, en consecuencia, la distribución de presiones con la cual el terreno reaccionará será idéntica a la distribución uniforme de presiones colocada sobre dicho cimiento.

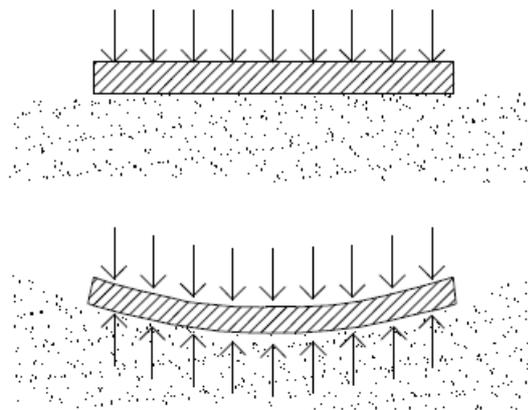


Figura 1. Distribución de presiones en cimentaciones flexibles  
Fuente: Pérez (2012)

Si, por el contrario, la subestructura fuera infinitamente rígida (Figura 2), el asentamiento del cimiento sería uniforme. En casos intermedios de rigidez, el valor medio del asentamiento podrá ser similar al anterior, pero su distribución estará, evidentemente, condicionada por la rigidez del cimiento. Así, bajo los extremos del cimiento (zonas AB y CD), el asentamiento será mayor que el correspondiente a la cimentación flexible; mientras que en el centro (zona BC), el asentamiento será menor. En consecuencia, las presiones de respuesta del terreno en los extremos del cimiento rígido serán superiores a las correspondientes del cimiento flexible y, por el contrario, en su centro serán menores. Resulta así una distribución no uniforme de presiones, caracterizada por unos valores máximos en los extremos y un valor mínimo en el centro.

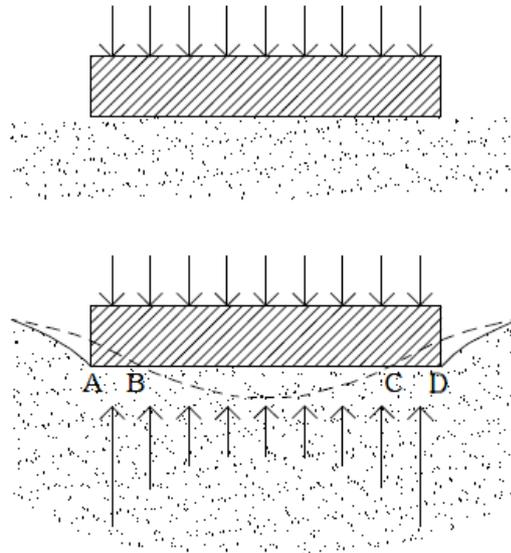


Figura 2. Distribución de presiones en cimentaciones rígidas  
Fuente: Pérez (2012)

Si el terreno se considerara elástico y de resistencia indefinida, la presión bajo los bordes A y D de la cimentación rígida sería infinita. Dado que la resistencia del terreno es limitada, dichas presiones podrán ser

elevadas, pero tendrán un valor finito. En el caso de arcillas (Figura 3), la distribución de presiones será en general muy semejante a la teórica del ejemplo anterior; sin embargo, la resistencia limitada del terreno producirá en los extremos unas zonas de plastificación que atenuarán las presiones de borde y las redistribuirá hacia el centro de la cimentación. En el caso de arenas, dado que la falta de confinamiento en el borde del cimiento, supuesta ésta en superficie, no permitiría el desarrollo de presiones elevadas, la distribución tomará en general la forma parabólica que se indica en la Figura 4.

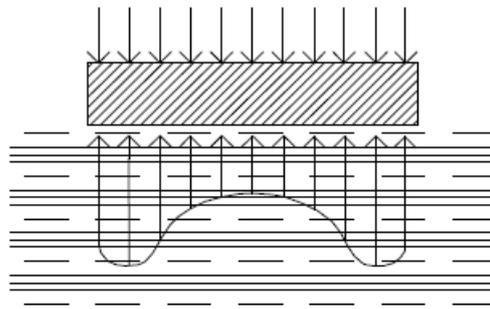


Figura 3. Distribución de presiones en cimentaciones rígidas sobre arcillas  
Fuente: Pérez (2012)

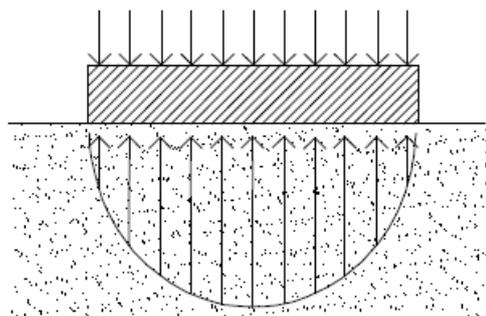


Figura 4. Distribución de presiones en cimentaciones rígidas sobre arenas  
Fuente: Pérez (2012)

Por lo tanto, se puede ver observar, que los diagramas de asentamientos y de reacciones del terreno dependen de la clase de suelo y de

la rigidez de la estructura de la cimentación. Un cimiento real puede quedar entre los dos casos de los extremos señalados, pues su rigidez no necesariamente es nula o infinita.

#### 2.1.4. Modelos de interacción suelo-estructura

Existen modelos dinámicos aceptados que, a través de coeficientes de rigidez, van a expresar cómo es que realmente interactúa el suelo con la estructura. A continuación, se muestran algunos de los modelos ISE más conocidos:

**2.1.4.1. Modelo dinámico D.D. Barkan – O.A. Savinov.** Es un modelo teórico-experimental, que está basado en la forma con la que interactúa la cimentación con la base de fundación en forma de un proceso establecido de vibraciones forzadas. El científico D.D. Barkan propuso unos coeficientes de rigidez que estén en función de los coeficientes de compresión y desplazamiento elástico que actúan sobre una inercia y área. En este modelo se restringe el giro alrededor del eje Z, por lo tanto, solamente se calculan cinco de los seis grados de libertad, según las siguientes ecuaciones:

$$K_z = C_z A \quad (1)$$

$$K_x = C_x A \quad (2)$$

$$K_\phi = C_\phi I \quad (3)$$

Donde:

$C_z, C_\phi$ : Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme.

$C_x$ : Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme.

$A$ : Área de la base de la cimentación.

I: Momento de inercia de la base de la cimentación respecto al eje principal  $z_1$ , perpendicular al plano de vibración.

Los coeficientes  $C_x$ ,  $C_z$  y  $C_\phi$ , no dependen únicamente de las características elásticas del suelo sino también de otros factores, por tal motivo, es necesario analizarlos de tal forma que se puedan encontrar las expresiones adecuadas para su cálculo. Dos modelos fueron analizados: modelo de semiespacio elástico isotrópico con poco peso y el modelo M.M. Filonenko-Borodich, obteniéndose las fórmulas siguientes, para los coeficientes de compresión y desplazamiento elástico:

$$C_z = X_z \cdot \frac{E}{1 - u^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

$$C_x = X_x \cdot \frac{E}{(1 + X_x)(1 - u)} \cdot \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

$$C_\phi = X_\phi \cdot \frac{E}{1 - u^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

Donde:

$X_z$ ,  $X_x$ ,  $X_\phi$ : Coeficientes, dependientes de la relación de las dimensiones de la base de la cimentación;

$\mu$ : Coeficiente de Poisson del suelo

Las principales deficiencias de este modelo, consiste en que no describe la dependencia entre los coeficientes  $C_z$ ,  $C_x$ ,  $C_\phi$  con las dimensiones de la base de la cimentación, y lo que es mucho más importante, no considera las propiedades inerciales de los suelos. Por tales motivos se plantearon las siguientes precisiones al modelo en base a las investigaciones teóricas, efectuadas por el científico O.A.

Shejter para el problema de vibraciones forzadas de un cuño circular muy pesado, apoyado sobre un semi-espacio elástico isotrópico pesado. Aunque la concepción de masa “adherida” del suelo, introducida por O.A. Shejter, no tuvo una repercusión directa, las investigaciones teóricas y experimentales permitieron identificar la dependencia de los coeficientes  $C_z$ ,  $C_x$ ,  $C_\phi$  con la presión estática  $\rho$ , que transmite la cimentación a la base. Finalmente, podemos determinar los coeficientes de compresión y desplazamiento del modelo D.D. Barkan-O.A. Savinov como:

$$C_z = C_0 \left[ 1 + \frac{2(a+b)}{\Delta \cdot A} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (7)$$

$$C_x = D_0 \left[ 1 + \frac{2(a+b)}{\Delta \cdot A} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (8)$$

$$C_\phi = C_0 \left[ 1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta \cdot A} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (9)$$

Donde:

$C_0$ ,  $D_0$ : Coeficientes determinados a través de experimentos realizados para  $\rho = \rho_0$

a, b: Dimensiones de la cimentación en la planta.

$\Delta$ : Coeficiente empírico, asumido para cálculos prácticos ( $\Delta = 1m^{-1}$ ).

Para el coeficiente  $D_0$ , se tiene:

$$D_0 = \frac{1-u}{1-0.5u} \cdot C_0 \quad (10)$$

Para cálculos prácticos se recomienda utilizar las siguientes fórmulas:

$$C_0 = 1.7 \cdot \frac{E_0}{1-u^2} \cdot 10^{-3} \left( \frac{kg}{cm^3} \right) \quad (11)$$

$$D_0 = 1.7 \cdot \frac{E_0}{(1-u)(1-0.5u)} \cdot 10^{-3} \left( \frac{kg}{cm^3} \right) \quad (12)$$

Donde:

$E_0$ : Módulo de elasticidad, calculado experimentalmente para presión estática del suelo de 0,1-0,2 kg/cm<sup>2</sup>.

**2.1.4.2. Modelo equivalente utilizando elementos p-y.** Es un modelo que reemplaza al suelo por una serie de resortes espaciados uniformemente a lo largo de la longitud empotrada de la pila. Estos resortes tienen la función de representar el comportamiento no lineal del suelo bajo la acción de una fuerza sísmica, calibradas por medio de experimentos reales como, por ejemplo: arcillas de consistencia media saturadas por Matlock (1970), para arcillas duras por Reese (1975).

**2.1.4.3. Modelo equivalente cantiléver.** Considera al pilote totalmente empotrada a una cierta profundidad bajo el nivel del suelo y la condición de carga es exclusivamente axial, por tal razón el suelo es ignorado. La longitud de empotramiento  $L_f$  es determinada con fórmulas empíricas (Davisón y Robinson 1965) obteniendo así una rigidez total del sistema suelo-pilote.

$$L_f = 1.4 \left[ \frac{E_p I_{py}}{E_c} \right]^{0.25} \quad \text{Arcilla} \quad (13)$$

$$L_f = 1.8 \left[ \frac{E_p I_{py}}{n_h} \right]^{0.20} \quad \text{Arena} \quad (14)$$

En estas ecuaciones  $L_f$  es la profundidad hasta donde se considera que el pilote esta empotrado,  $E_p$  módulo de elasticidad del pilote y  $I_p$  inercia gruesa del pilote  $m^4$ ,  $E_c$  es el módulo elástico del suelo para arcillas que es igual a  $67S_u$  en Mpa, y  $n_h$  tasa de incremento del módulo del suelo en función de la profundidad para las arenas, Los coeficientes 1.4 y 1.8 (Ec. 1 y 2) Son valores aproximados, obtenidos de una prueba al medir la curvatura y el colapso de manera simultánea.

Tabla 1. Valores representativos de  $n_h$  para arenas en Mpa/mm

Consistencia	Seca o Húmeda	Sumergida
Suelta	$9.4 \cdot 10^{-3}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$
Media	0.025	0.013
Densa	0.063	0.031

Fuente: Jaramillo (2004)

Estos modelos tienen la desventaja de que no consideran el amortiguamiento que el suelo añade a la estructura; además que los momentos calculados a partir de los mismos no son reales. Para solucionar este inconveniente se han desarrollado métodos como DDBD (Suárez, 2005), que consideran el amortiguamiento viscoso equivalente y que determinan los momentos en forma adecuada.

**2.1.4.4. Modelación en DDBD.** En el Diseño Directo Basado en Desplazamientos se modela el sistema suelo-pilar con una longitud de empotramiento que se encuentra en el punto de momento máximo para pilares de cabeza libre y cabeza empotrada (Suárez and Kowalsky, 2007). El procedimiento del método requiere la definición de un desplazamiento de diseño, rigidez y resistencia requerida, de tal

manera, que el desplazamiento de diseño no sea excedido por los desplazamientos que se producen ante una amenaza sísmica.

Tabla 2. Tendencia de  $L_e$  para columnas en arcillas suaves y arenas

Tipo de Suelo	Longitud efectiva $L_e$
Arcilla - Su 20 (Kpa)	$L_e = 6.38D + 0.69L_a$
Arcilla - Su 40 (Kpa)	$L_e = 4.96D + 0.71L_a$
Arena - $\Phi=30^\circ$	$L_e = 4.39D + 0.82L_a$
Arena - $\Phi=37^\circ$	$L_e = 3.40D + 0.84L_a$

Fuente: Jaramillo (2004)

### 2.1.5. Desempeño estructural de puentes

La mayoría de los elementos estructurales que forman un puente tienen un comportamiento complejo, que junto con un conocimiento incierto de las propiedades características de su material componente, trae como consecuencia que, para el mejor entendimiento del comportamiento de las estructuras, haya que establecer algunas clasificaciones dependientes del nivel de resultados. Por ello se establece dos posibles clasificaciones para el análisis de sistemas de puentes, la primera de ellas comprende los modelos elásticos y los inelásticos, y la segunda los modelos continuos, discretos y estructurados.

**2.1.5.1. Modelos continuos, discretos y estructurados.** Las componentes independientes de una estructura pueden ser modeladas usando varios tipos de elementos (Fig. 5), siendo el aspecto más importante la selección de este con sus propiedades asociadas. Por ejemplo, en un análisis lineal los elementos más comunes son las vigas y las columnas, en donde previo al análisis se definen las rigideces axiales, a flexión, cortante y torsión; en ocasiones es necesario emplear otro

tipo de modelo (modelación de cimentación flexibles por medio de resortes).

En el caso del análisis no lineal, aunque la fase más importante sigue siendo la selección de los elementos con sus propiedades bien definidas, es muy diferente, ya que los elementos son más complejos a los vistos en el análisis lineal, pues no solamente es necesario el conocimiento de las distintas rigideces, sino que además se necesita una descripción detallada de las mismas cuando los elementos son sometidos a las diferentes acciones.

En sentido general, un modelo continuo a diferencia de uno discreto posee un número infinito de elementos y de grados de libertad de desplazamientos; siendo estos últimos frecuentemente utilizados en el caso de estructuras completas y dada su complejidad se recomienda su uso en elementos simples. Una vez conocidas sus propiedades pueden ser utilizados en el modelo discreto de la estructura completa. El comportamiento lineal de una estructura puede ser capturado por medio de elementos simples como los mencionados anteriormente, sin embargo, cuando existe un comportamiento no lineal resulta poco aproximado, por lo que se recomienda el uso de elementos estructurados, que son aquellos en los que se subdivide el elemento en subelementos de menor longitud, definiendo nudos adicionales en el interior de este. Se puede concluir entonces que en el análisis de elementos estructurados se combinan modelos discretos con modelos

continuos y en su análisis se emplean técnicas numéricas corrientes, así como otras técnicas de mayor grado de sofisticación.

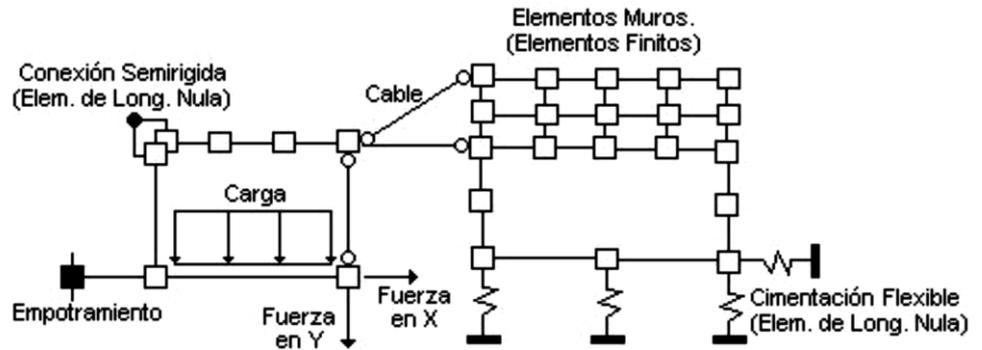


Figura 5. Componentes de un modelo discreto de elementos  
Fuente: Vidaud y Ayala (2014)

**2.1.5.2. Modelos de análisis lineal y de análisis no lineal.** Las particularidades más importantes de los mismos son: (1) En un modelo lineal de un determinado elemento solo se necesita la rigidez, por lo que se puede deducir que son menos complejos que los no lineales, que si tienen que disponer de una gran cantidad de información. (2) En el análisis lineal es aplicable el principio de superposición tanto en las cargas como en los modos de vibración, no así en el análisis no lineal. (3) Los algoritmos de cálculo del análisis lineal son más simples y confiables, muchas veces incluso, podemos tratarlos como “cajas negras”. Por otra parte, en el análisis no lineal los programas son de gran complejidad y llenos de incertidumbres en su aplicación, lo que trae como consecuencia que sea necesario conocer a fondo sus características y limitaciones. (4) Comúnmente en el análisis lineal solo se necesitan los valores máximos de desplazamientos y de elementos mecánicos en los miembros, sin

embargo, en el no lineal se necesitan una gran cantidad de información de salida, lo cual resulta significativamente más complicado.

**2.1.5.3. Modelado de elementos en estructuras de puentes.** Se presenta una serie de recomendaciones prácticas que permitirán realizar la modelación de los diferentes elementos componentes de un puente, recordando que la geometría y la caracterización efectiva de los miembros, la definición de los apoyos y uniones, así como la participación de la masa y de las cargas permanentes son tomados en cuenta.

**Superestructura.** La superestructura es el conjunto de todos los componentes del puente que forman la estructura de la cubierta (tablero y sus soportes). Generalmente en un análisis dinámico se supone que permanece elástico, limitando el comportamiento no lineal solo a las juntas y conexiones entre elementos, y a las conexiones con la subestructura. Está claro que muchos puentes geoméricamente constituyen estructuras sumamente complejas, sin embargo, es posible efectuar el estudio de algunas de estas estructuras por medio de un modelo relativamente simple, en el cual es posible lograr una adecuada caracterización de la rigidez efectiva y de la masa distribuida. Generalmente las superestructuras de los puentes pueden ser consideradas infinitamente rígidas en su plano, por lo que se puede asumir que bajo cargas sísmicas se comportará como cuerpo rígido, reduciendo el problema a resolver al análisis las pilas con sus correspondientes restricciones a la superestructura rígida. Sin

embargo, en puentes estrechos, largos o puentes conectores intercambiables en los que la superestructura no puede ser considerada rígida es necesario una discretización de la superestructura mediante la introducción de elementos vigas (Fig. 6d) o en su defecto a través de un elemento con propiedades equivalentes, colocado longitudinalmente a lo largo de toda la longitud del puente (Fig. 6e).

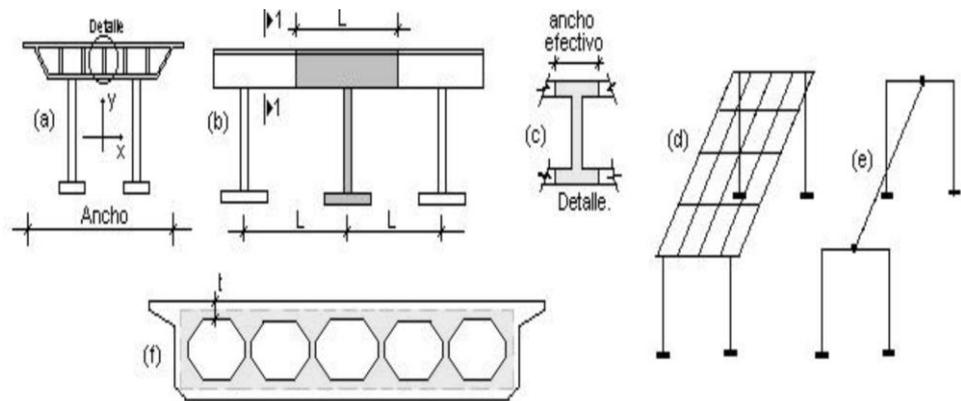


Figura 6. (a) Elevación transversal y (b) Longitudinal; (c) Detalle; (d) Modelo de vigas y (e) Elementos de prop. equiv.; (f) Área equiv.  
Fuente: Vidaud y Ayala (2014)

En el caso de subestructuras de concreto reforzado sometidas a la acción combinada de sismo y de cargas gravitacionales se considera un agrietamiento incrementado, por lo que la rigidez  $EI_x$  ( $E$ : Módulo de elasticidad e  $I_x$ : Momento de inercia alrededor del eje de flexión) se determina tomando en cuenta una rigidez agrietada. El producto  $EI_x$  no refleja únicamente la rigidez efectiva o agrietada del elemento, sino también el estado del mismo una vez que haya ocurrido teóricamente la primera fluencia. Algunos de estos textos (Priestley et al. 1996) estiman esta rigidez por medio de la obtención de  $I_e$  (momento de inercia efectivo), que se obtiene a su vez de diagramas que relacionan, para diferentes tipos de secciones, la cuantía de

refuerzo y el cociente del esfuerzo axial actuante entre el producto del área bruta de la sección analizada y la resistencia del concreto a la compresión. Algo muy similar se usa en la estimación del área de cortante ( $A_{ve}$ ) que se toma en cuenta para considerar las deformaciones de cortante que se generan por flexión en el miembro de concreto agrietado, en este caso existe la misma dependencia que en la rigidez a flexión, solo que la falta de datos experimentales trae como consecuencia que tenga que asumirse que la rigidez a cortante sea función directa de la rigidez a flexión y que puede ser cuantificada a través de la Ec. 15. En el caso de los subelementos que forman la subestructura se recomienda la obtención de las características reales de los mismos, aunque es también aplicable y sumamente práctico determinar propiedades reducidas de la sección bruta, Ec. 16.

$$G.A_{ve} = G.A_v \frac{E.I_e}{E.I_g} \quad (15)$$

Donde  $G$ ,  $A_v$ , y  $I_g$  son el módulo de cortante, el área bruta de cortante y el momento de inercia de la sección bruta, respectivamente.

$$E.I_e = \alpha.E.I_g \quad (16)$$

Donde  $\alpha$  puede ser 0.5 o 1.0 para concreto reforzado o presforzado, respectivamente.

En la estimación de la rigidez torsional ( $J$ ) se pueden emplear los principios de la mecánica clásica, siempre y cuando el momento torsor de agrietamiento no sea excesivo en el punto donde se considere que la rigidez torsional se reduce significativamente.

Un criterio para modelar subestructuras huecas se brinda en la Figura 6f, en donde la rigidez torsional puede ser estimada por la Ec. 17 y en donde la parte sombreada representa la zona del flujo de cortante; con la obtención de  $J$  se puede obtener la relación entre  $T$  (esfuerzo de cortante) y la rotación  $\theta$  en una viga isotrópica, Ec 18. En caso de suponer la sección agrietada, la Ec. 17 se transforma en la Ec. 19, en donde se puede estimar que debido al agrietamiento tanto el área ( $A$ ) como el perímetro ( $P$ ) deben de ser reducidos por medio de las Ecs. 20 y 21. No obstante se ha demostrado que una buena aproximación en la estimación de la rigidez torsional lo brinda la Ec. 22, en donde  $J_e$  es el momento torsional equivalente.

$$J = \frac{4.A_0^2}{P_0} \quad (17)$$

$$T = G.J.\theta \quad (18)$$

$$J_{cr} = \frac{4A^2}{PEc} Es \sqrt{\frac{At(Ae+Ap)}{sP}} \quad (19)$$

$$\bar{A} = 0.85A_0 \quad (20)$$

$$\bar{P} = 0.90P_0 \quad (21)$$

En las Ecs. 20 y 21  $A_0$  y  $P_0$  son el área y el perímetro definidos por la zona sombreada de la Figura 6f.  $A_e$ ,  $A_p$ ,  $A_t$  y  $s$  en la Ec. 19 son las áreas de refuerzo, pre-esfuerzo, acero transversal y espaciamiento de este último, respectivamente.

$$G.J_e = \beta.G.J \quad (22)$$

En este caso  $b$  puede ser tomado como 1 para secciones no agrietadas o como 0.05 para las agrietadas.

***Diafragmas.*** La rigidez transversal de un puente se puede incrementar por medio de diafragmas en la superestructura, estos se modelan generalmente a través de una discretización de vigas equivalentes de sección T o I, colocadas transversalmente y que consideran un ancho equivalente de aproximadamente 8 veces el espesor de la losa existente.

***Pórticos múltiples.*** Se trata de pórticos compuestos por dos o más columnas que tienen la característica que todas trabajan al unísono, contribuyendo en la respuesta sísmica debido al incremento de la rigidez y de la capacidad durante una acción cíclica; un modelo como este en un análisis plano se concibe por medio de la incorporación de elementos vigas y columnas con propiedades efectivas como las tratadas anteriormente (Figura 7a). En el análisis lineal las propiedades efectivas se definen por medio de las expresiones ya expuestas (ver Ecs. 15 a la 22), teniendo la rigidez axial la particularidad de ser reducida para tomar en cuenta la influencia de la carga axial, el agrietamiento por flexión y la cuantía de refuerzo (Ec. 23).

$$E.Ae = E.Ae \frac{E.I_e}{E.I_g} \quad (23)$$

Como se observa en la Fig. 7 a y b los nudos se ubican en zonas donde se puedan capturar las solicitaciones críticas generadas por el estado

de cargas considerado; estando el elemento de conexión situado en los extremos; las propiedades de los miembros pueden considerarse agrietadas o efectivas. Para la correcta caracterización de las propiedades de los pórticos múltiples es necesario estimar el nivel de carga axial que además de ser dependiente de las cargas gravitacionales son también función de la acción sísmica (cíclica) considerada, o sea que para estimar la capacidad o la rigidez de estos elementos se deberá de actualizar, ajustar y definir el estado de esfuerzo axial generado por la combinación de la acción sísmica y las acciones gravitacionales (Método de Empujón para Pórticos en 2D).

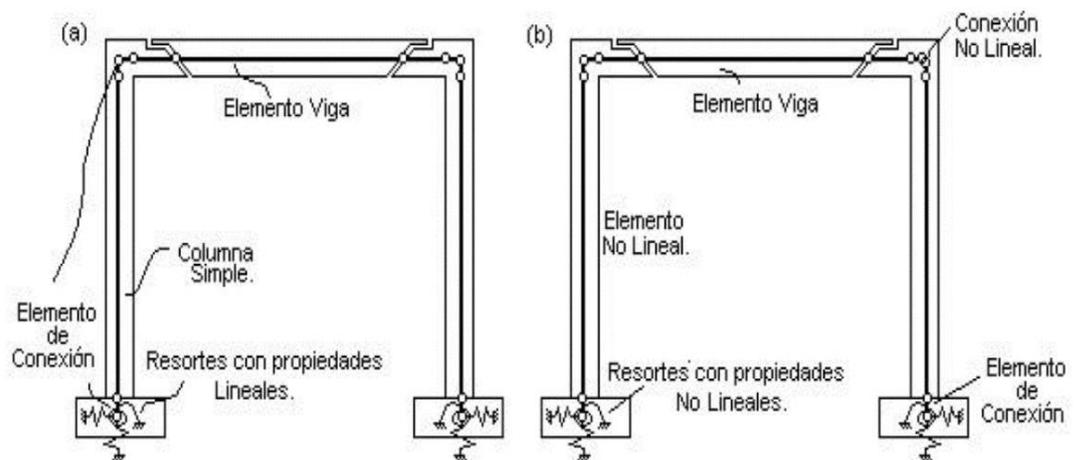


Figura 7. (a) Análisis elástico lineal (b) Análisis no lineal  
Fuente: Vidaud y Ayala (2014)

El análisis no lineal tiene mayor complejidad, en él las estructuras pueden ser modeladas adicionándoles articulaciones plásticas en zonas en donde supuestamente pueda generarse plastificación por flexión, así como resortes no lineales en las conexiones y en la cimentación, todo esto, por supuesto, con el objetivo de poder estimar adecuadamente la respuesta global no lineal característica de la estructura.

**Cimentación.** La cimentación de un puente tiene el objetivo de dotar a la estructura global de una satisfactoria resistencia lateral, vertical y rotacional, cuando esta se encuentre sometida a un estado de acciones verticales y/o horizontales, esta resistencia dependerá de la geometría de la cimentación, de las características geotécnicas del suelo y de la interacción suelo - estructura. La cimentación aislada es recomendable en suelos duros, en donde los resortes traslacionales se asumen rígidos y la rotación únicamente se considera en caso de que exista desplazamiento o balanceo de la subestructura completa. La resistencia en la dirección vertical se logra por medio de la propia presión de compresión, en cambio en la dirección horizontal debido a la presión pasiva del suelo que rodea a la cimentación, así como por medio de la fricción a lo largo de las caras y de la base de la zapata. La resistencia en la dirección rotacional se logra a través de la sobrecarga generada por el suelo que se encuentra encima de la cimentación, así como por el efecto de las cargas gravitacionales generadas por la estructura global para tomar en cuenta la traslación y la rotación cuando se considere. En ocasiones se cuenta con una estimación del coeficiente de reacción del suelo  $k_s$  (en  $\text{kg/m}^3$ ), de acuerdo a ello la estimación de la rigidez vertical y rotacional de una cimentación aislada de dimensiones  $D_f \times B_f$ , considerada como cuerpo rígido para que las condiciones de apoyos supuestas puedan ser modeladas como un punto simple con resortes, que físicamente se

encuentran en la frontera entre la columna y la zapata de cimentación se calcula según las Ecs. 24 y 25.

$$Kv = Bf \cdot Df \cdot ks \quad (24)$$

$$Kr = \frac{1}{12} Bf^3 \cdot Df \cdot ks \quad (25)$$

**Pilas y pilotes continuos.** En ocasiones las características del suelo permiten concebir un único elemento que cubra tanto la pila como la cimentación (pilote), esto es recomendable para puentes estrechos. El modelado con fines de estimar la demanda sísmica depende de las características geotécnicas del suelo circundante; por medio del módulo de Young (en Kg/cm<sup>2</sup>) es posible suponer un sistema de resortes de Winkler para las reacciones laterales del suelo, y así concebir un sistema de resortes (Fig. 8) situados a lo largo de toda la longitud del pilote (por debajo del nivel de terreno) en donde la rigidez de cada uno de estos con fines no lineales puede ser dependiente de las dimensiones de la sección transversal del elemento, de la profundidad a la que se encuentre el resorte considerado y de las propiedades del suelo (módulo de Young).

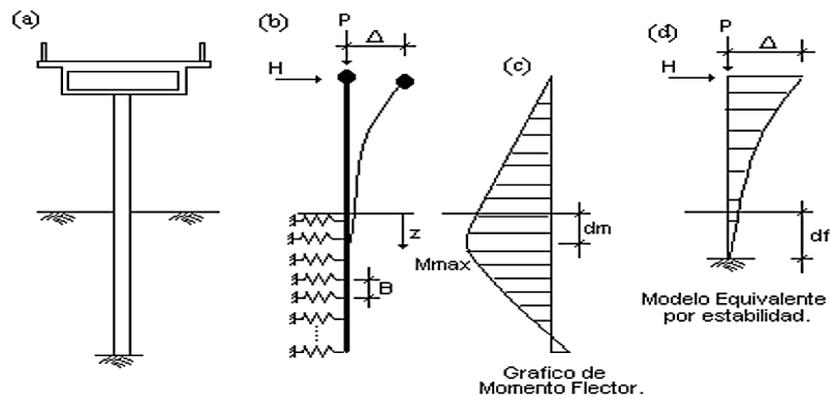


Figura 8. Pilas y Pilotes continuos (a) y (b) Prototipo global;  
(c) Modelo de los resortes del suelo; (d) Modelo equivalente por estabilidad  
Fuente: Vidaud y Ayala (2014)

**Estribos.** Consideraciones de modelado realizadas en la estimación de la rigidez y la capacidad de estribos de puentes, así como también del amortiguamiento de la masa del suelo circundante, pueden tener una importante influencia en la respuesta dinámica de pequeños sistemas de puentes, por supuesto en dependencia del tipo de estribo que se considere en el análisis: monolíticos, apoyados o los construidos integralmente con pilotes; todos tienen en común que son estructuras masivas que movilizan e interactúan con la masa de terreno y que en función de su geometría poseen gran rigidez, lo que permite que absorban grandes fuerzas sísmicas. La capacidad y la rigidez de estos se estiman para acciones sísmicas o dinámicas por medio de formulaciones empíricas, muchas veces dependientes de una presión efectiva máxima amplificadas del suelo (Priestley et al. 1996). Se concluye que la rigidez de un estribo puede estimarse para un análisis espectral por medio de un procedimiento iterativo, basado en un análisis elástico lineal que supone un desplazamiento y calcula su rigidez resultante, finalizando el procedimiento una vez que se tenga un desplazamiento estable. Para muchos estribos se ha demostrado que los resultados obtenidos conllevan a resultados invariables para el rango inelástico, por lo que se recomienda que varios niveles de desplazamientos se designen correctamente. No obstante, algunas referencias en base a estudios experimentales brindan algunos criterios empíricos para la estimación de la rigidez de los estribos, en

función del conocimiento previo de las características geotécnicas del terreno.

#### **2.1.6. Peligro sísmico**

Los métodos de cálculo de la peligrosidad sísmica se clasifican en dos grandes grupos: deterministas y probabilistas.

Los métodos deterministas fueron los primeros desarrollados, y tienen por objetivo obtener la acción sísmica en el emplazamiento, sin proporcionar información sobre su periodo de retorno. Tampoco analizan las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo, ni contienen criterios claros que permitan asegurar que el sismo obtenido sea el máximo esperado. A pesar de esos inconvenientes, su uso ha sido generalizado durante dos décadas, a partir de los años 60.

Los métodos probabilistas comenzaron a desarrollarse a finales de los 60, teniendo por objetivo estimar las acciones sísmicas en el emplazamiento con una probabilidad asociada, lo que permite diseñar una construcción para cualquier nivel de riesgo aceptable; así como llevar a cabo un análisis de las incertidumbres derivadas de la aplicación de las distintas opciones de cálculo. A diferencia de los métodos deterministas, los probabilistas consideran los efectos de todos los terremotos que pueden afectar a un emplazamiento dado, y tienen en cuenta las leyes de recurrencia de los mismos. Dan como resultado estimaciones de la probabilidad de excedencia para cada valor de la intensidad del movimiento esperado en el emplazamiento, durante un periodo de tiempo dado, quedando así representada la peligrosidad por curvas de probabilidad. Un esquema del método seguido es mostrado en la Figura 9.

Esas funciones finales relacionan para cada fuente sismogénica, la tasa de excedencia de cada aceleración en el basamento rocoso, asociadas con el período de retorno.

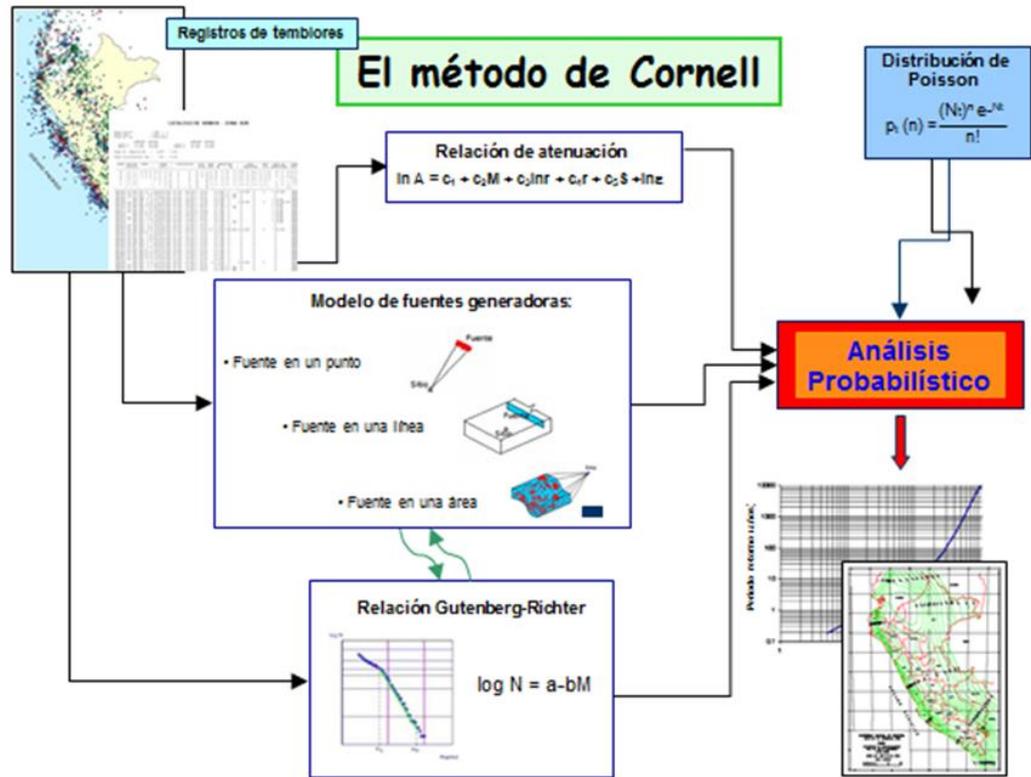


Figura 9. Esquema de metodología de cálculo de la peligrosidad probabilista  
Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

El fundamento matemático de estos métodos fue desarrollado inicialmente por Cornell (1968), y se basa esencialmente en la adopción de un modelo de zonas sismogénicas con las que se realiza una compartimentación del área de influencia, y en el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia; sumando posteriormente la contribución de todas las fuentes para obtener la función de probabilidad que representa la peligrosidad en el emplazamiento de la estructura.

De esta forma, los efectos de todos los terremotos de diversos tamaños que ocurren de forma aleatoria dentro de cada una de las fuentes se integran dentro de una curva que proporciona probabilidades de excedencia para diferentes valores del parámetro del movimiento en el emplazamiento. Esta curva es una posible expresión de la peligrosidad, que a menudo se representa en términos de periodo de retorno en lugar de probabilidad de excedencia. Basándose en las consideraciones teóricas anteriores se han desarrollado numerosos programas de cálculo, siendo los más usados en la actualidad son: RISK y CRISIS 2007.

#### **2.1.6.1. Determinación de las fuentes sismogénicas**

Una fuente sismogénica es aquella zona o volumen geográfico que tiene similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, tales que se pueda considerar que posee un potencial sísmico homogéneo, es decir, en la que el proceso de generación y recurrencia de sismos es espacial y temporalmente similar. La definición de las fuentes sismogénicas y su demarcación es de gran importancia para estudios cuantitativos de peligro sísmico.

La definición de las fuentes sismogénicas ha sido realizada por Castillo (1993) y por Aguilar - Gamarra (2009). La determinación de estas fuentes sismogénicas se basó en el mapa de distribución de epicentros, así como en las características tectónicas del área de influencia. La actividad sísmica del Perú es el resultado de la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca; y por otro lado el proceso de reajuste tectónico de la cordillera de los Andes. Esto ha

permitido clasificar a las fuentes en dos tipos: las de subducción y las continentales. Las fuentes de subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca. Las fuentes continentales están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. Se han presentado las fuentes como áreas, ya que no existen suficientes datos para modelar las fallas activas como fuentes lineales en este tipo de análisis.

Las figuras 10 y 11 muestran las 20 fuentes sismogénicas definidas. La figura 10 muestra las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 que están ubicadas a lo largo de la costa y representan la sismicidad superficial en la zona de Benioff (0 – 70 Km.). Además, muestran las fuentes continentales 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 que están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. La figura 11 muestra las fuentes 15, 16, 17, 18 y 19 que representan la sismicidad intermedia (71 – 300 Km.); así como la fuente 20 que representa la sismicidad profunda (300 – 700 Km.).

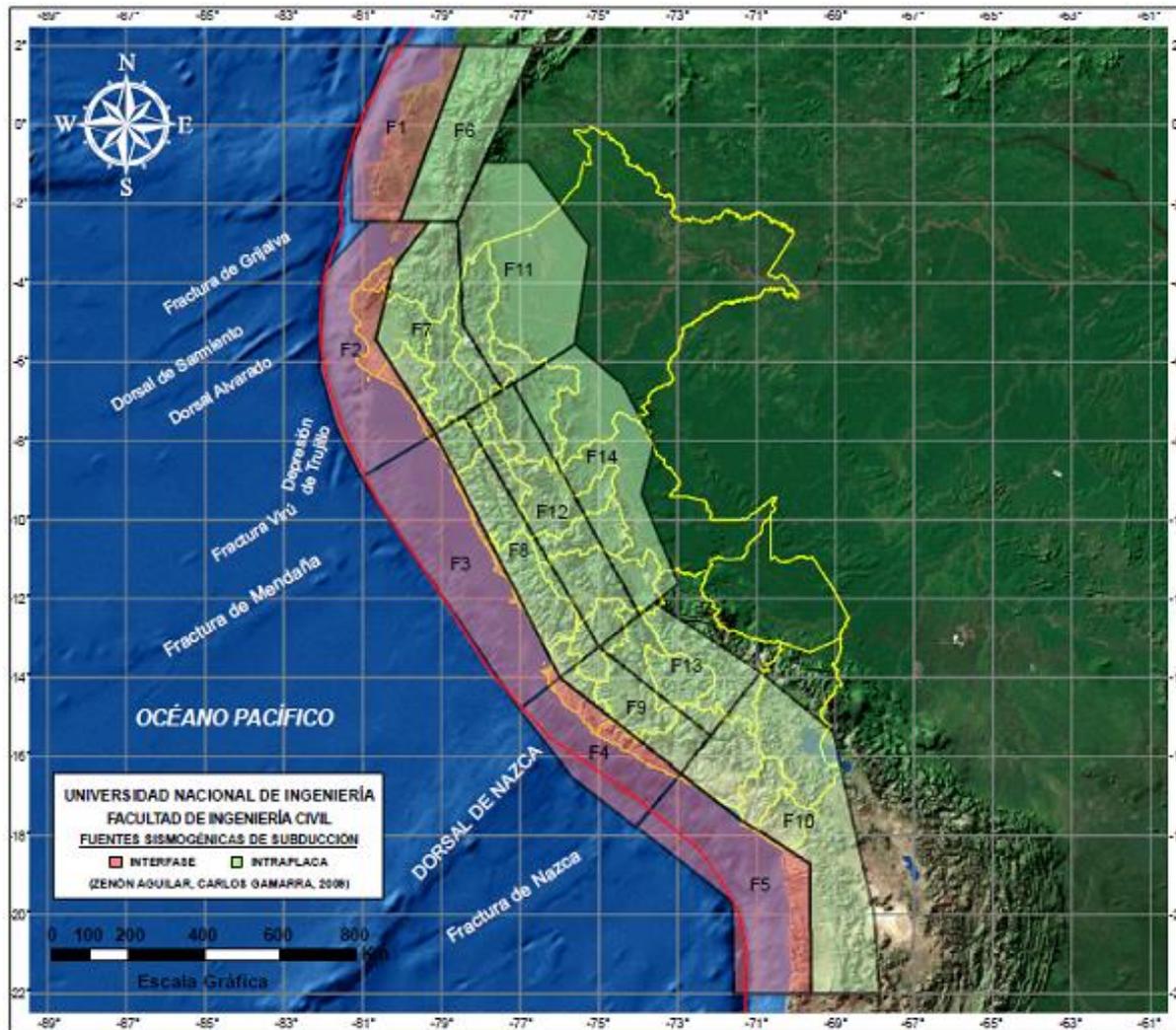


Figura 10. Fuentes Sismogénicas de subducción de Interfase e Intraplaca  
Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

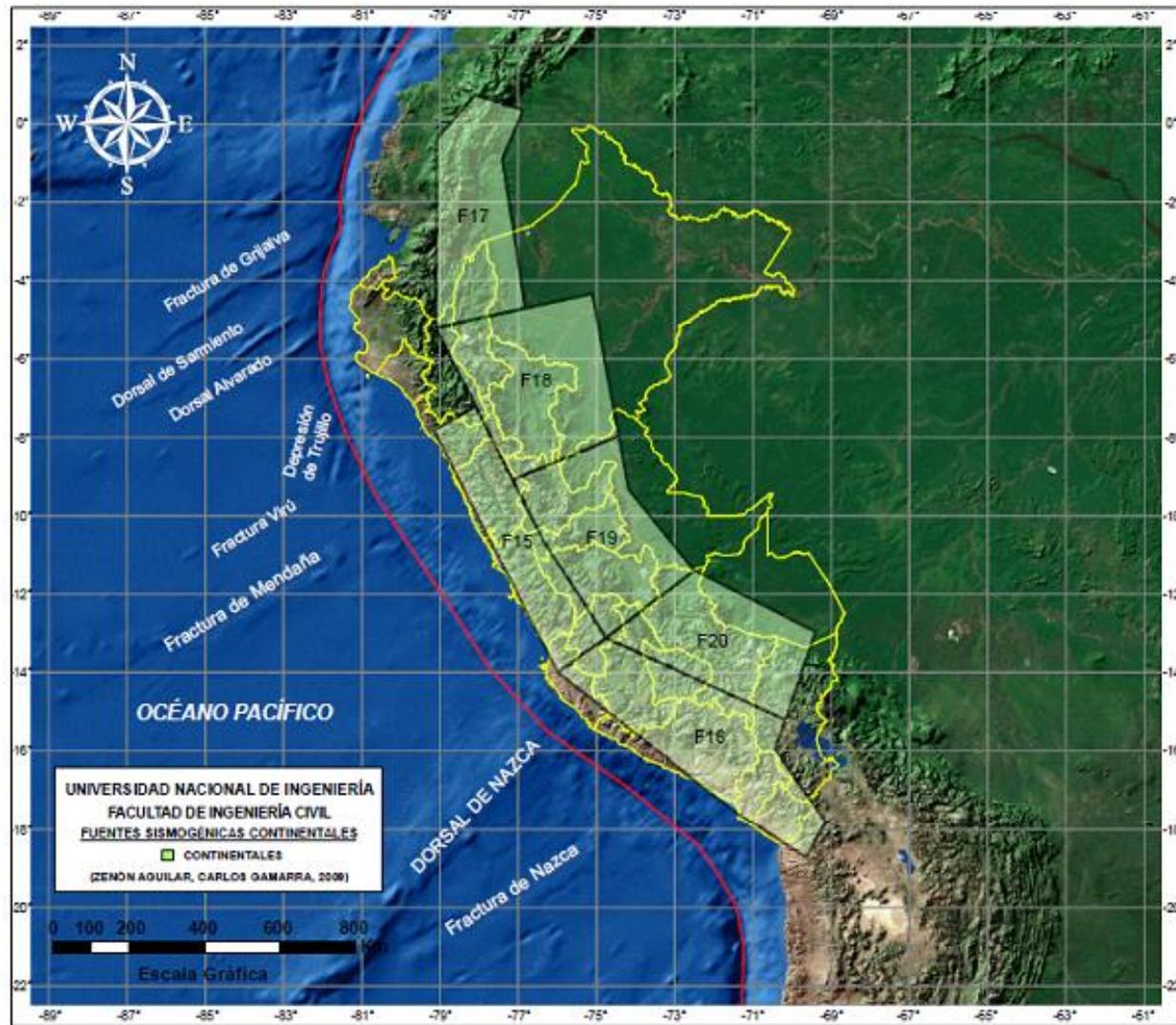


Figura 11. Fuentes Sismogénicas de corteza superficial o continental  
 Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

### 2.1.6.2. Determinación de los parámetros de recurrencia sismológicos

En el análisis de peligro sísmico, los parámetros sismológicos caracterizan las fuentes sismogénicas en base a la actividad sísmica que presentan en el tiempo, es decir, la determinación de los parámetros sismológicos de una fuente determinada contempla la evaluación de la recurrencia sísmica de ésta.

Para evaluar la variabilidad de las magnitudes de los eventos sísmicos que cada fuente pueda generar es indispensable evaluar la recurrencia sísmica de la fuente. La recurrencia sísmica representa el número de eventos mayores o iguales a alguna magnitud dentro de la fuente y está definida por la pendiente de la relación de recurrencia de Gutenberg y Richter ( $b$ ), la tasa media anual de actividad sísmica ( $\lambda_0$ ), la magnitud mínima ( $M_0$ ) y la magnitud máxima ( $M_{max}$ ).

La expresión que define la relación de recurrencia de la actividad sísmica de un determinado lugar es:

$$\text{Log } N = a - bM \quad (26)$$

Donde  $N$  es el número de sismos con magnitud mayor o igual a  $M$ , y  $a$  y  $b$  son constantes. El valor  $a$  describe la actividad o productividad sísmica ( $\log$  del número de eventos con  $M=0$ ). El valor  $b$ , el cual es típicamente cercano a 1 (Zúñiga y Wyss, 2001), es un parámetro tectónico que describe la abundancia relativa de grandes a pequeños eventos. Esta expresión fue reconocida primero en Japón por Ishimoto e Lida (1939) y posteriormente en California por Gutenberg y Richter

(1944). La ecuación 26 se puede expresar también de la siguiente forma:

$$N = \Gamma_0 e^{-\beta M} \quad (27)$$

Dónde:

$\Gamma_0 = 10^a$  ; es el número de sismos por unidad de tiempo con  $M > 0$

$\beta = b \ln 10$

Zúñiga y Wyss (2001) proponen que el valor absoluto de  $b$  depende también de la escala de magnitud usada, ya que hay una clara evidencia de que las escalas de magnitud cambian cuando se introduce una nueva instrumentación y/o nuevos procedimientos de análisis en la misma forma en que se modifica con el tiempo, y esto afecta las distribuciones de frecuencia-magnitud.

Para el análisis estadístico de los parámetros de recurrencia se utilizó el método de mínimos cuadrados que ajusta los valores a una recta en función a la densidad de datos que se tiene. Los datos empleados para el cálculo de los parámetros  $a$  y  $b$  se encuentran dentro del rango de valores de la magnitud mínima y máxima.

La tasa  $\lambda_0$  es la tasa media anual de ocurrencia de eventos mayores o iguales que la magnitud mínima de homogeneidad; para determinar la tasa  $\lambda_0$  se utiliza una variación del diagrama de Gutenberg y Richter, que consiste en dibujar un número acumulativo de eventos mayores o iguales que la magnitud mínima de homogeneidad versus el tiempo. La magnitud mínima de homogeneidad ( $M_0$ ) de un conjunto de eventos se determina mediante la gráfica de número acumulativo de

eventos versus magnitud y se define como el nivel para el cual los datos caen linealmente por debajo de ésta. Estos datos son ajustados a una línea recta que define los valores de a y b.

Para determinar  $M_{max}$ , magnitud máxima probable que puede ser liberada como energía sísmica (McGuire, 1974), fueron adoptados varios criterios:

- a) Cuando un gran sismo histórico (magnitud  $\geq 8.0$ ) fue registrado en el catálogo, esta magnitud fue elegida.
- b) Cuando no fue registrado un gran sismo, el máximo sismo histórico aumentado en 0.5 unidades en magnitud fue seleccionado como el sismo de magnitud máxima.
- c) Cuando aparecieron dudas respecto a las magnitudes históricas y algún tipo de indicación o evidencia geológica o neotectónica estuvo presente, criterios de expertos fueron privilegiados.

Para determinar las profundidades representativas de los hipocentros de las fuentes sismogénicas se utilizaron las secciones transversales a la Fosa Perú-Chile más próximas a los vértices de las fuentes, de tal manera que se modele la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Las tablas 3, 4, 5 y 6 muestran los parámetros sismológicos de recurrencia, las profundidades y coordenadas de las fuentes de subducción de interfase e intraplaca y de las fuentes continentales

respectivamente, utilizados en la evaluación del peligro sísmico en Huánuco.

Tabla 3. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas

Fuente	M <sub>w</sub>			
	M <sub>mín</sub>	M <sub>máx</sub>	$\beta$	Tasa
F 3	4.6	8.4	1.292	8.683
F 8	4.3	7.1	1.879	3.754
F 12	4.1	7.1	1.962	3.099
F 14	4.8	7.8	1.810	4.650
F 15	4.4	6.3	2.385	0.782
F 18	4.6	7.4	1.881	2.220
F 19	4.8	7.2	2.450	2.589

Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

Tabla 4. Coordenadas y profundidades de las fuentes de subducción de interfase

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (Km)
	Longitud	Latitud	
F3	-81.050	-8.931	30
F3	-79.156	-7.834	75
F3	-75.998	-13.999	75
F3	-77.028	-14.811	30

Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

Tabla 5. Coordenadas y profundidades de las fuentes de subducción de intraplaca

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (Km)
	Longitud	Latitud	
F8	-79.156	-7.834	80
F8	-78.427	-7.363	100
F8	-74.996	-13.218	115
F8	-75.998	-13.999	80
F12	-78.427	-7.363	100
F12	-77.177	-6.557	140
F12	-73.973	-12.421	135
F12	-74.996	-13.218	115
F14	-77.177	-6.557	145
F14	-75.600	-5.539	145
F14	-74.400	-6.567	155
F14	-73.589	-8.086	195
F14	-73.914	-9.347	170
F14	-72.963	-11.633	145
F14	-73.973	-12.421	140

Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

Tabla 6. Coordenadas y profundidades de las Fuentes Continentales

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (Km)
	Longitud	Latitud	
F15	-79.156	-7.834	25
F15	-78.084	-7.213	40
F15	-76.340	-10.670	40
F15	-74.760	-13.130	40
F15	-75.998	-13.999	25
F18	-79.100	-5.200	35
F18	-75.100	-4.330	35
F18	-74.422	-7.976	50
F18	-77.143	-9.079	50
F19	-77.143	-9.079	35
F19	-74.422	-7.976	35
F19	-74.170	-9.330	35
F19	-72.480	-11.400	40
F19	-74.760	-13.130	40
F19	-76.340	-10.670	35

Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

### 2.1.6.3. Determinación del peligro sísmico

El peligro sísmico se define por la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico que genere una aceleración igual o mayor que un valor dado. Por otro lado, es evidente que los sismos no son independientes mirados como una serie en el tiempo. Físicamente se requiere la acumulación de gran energía para generar un evento sísmico de gran magnitud, lo cual hace poco

probable que varios de estos eventos se sucedan en cortos períodos de tiempo. La ocurrencia de réplicas es otro claro ejemplo de que los sismos no son independientes entre sí. A pesar de ello en estudios de peligro sísmico se acepta que la ocurrencia de los sismos responde a una distribución de Poisson, lo que implica suponer lo siguiente:

- a) El número de ocurrencias de eventos sísmicos en un intervalo de tiempo es independiente del número que ocurre en cualquier otro intervalo de tiempo, es decir, los eventos son independientes entre sí.
- b) La probabilidad de ocurrencia durante un intervalo de tiempo muy corto es proporcional a la longitud del intervalo de tiempo.
- c) La probabilidad de que ocurra más de un evento sísmico durante un intervalo de tiempo muy corto es insignificante.

Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos: E1, E2,.....En, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la “probabilidad total” se tiene para la probabilidad de ocurrencia A:

$$P(A) = \sum_i^n P\left(\frac{A}{E_i}\right) \cdot P(E_i) \quad (28)$$

Donde P(A/Ei) es la probabilidad condicional que A ocurra, dado que Ei ocurra.

La intensidad generalizada (I) de un sismo en el lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o

intensidad epicentral) y de la distancia al lugar de interés. Si el tamaño del sismo (S) y su localización (R) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_s(s)$  y  $f_R(r)$  respectivamente; entonces el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que una intensidad dada, será:  $P(I \geq i)$  y está dada por:

$$P(I \geq i) = \iint P[I/(s,r)] f_s(s) f_R(r) ds dr \quad (29)$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, para analizar el peligro sísmico (Castillo y Alva, 1993). La evaluación de esta integral es efectuada por los programas de cómputo RISK y CRISIS desarrollados por McGuire (1976) y Ordaz et al (1999) respectivamente en el cálculo del peligro sísmico.

**Nivel de excedencia y confianza.** En el presente estudio, el nivel de excedencia ( $RISK_t$ ) y la probabilidad extrema se definen como la probabilidad que, en un tiempo determinado (tiempo de vida útil) ocurra un sismo de intensidad  $\geq a$ .

El nivel de excedencia se expresa como:

$$RISK_t = 1 - e^{-\frac{t}{R_y(a)}} \quad (30)$$

Donde:

t : tiempo de vida útil

$R_y(a)$  : periodo de retorno promedio en años de un sismo de intensidad  $\geq a$

El nivel de confianza se expresa como:

$$\text{Nivel de confianza} = 1 - RISK_t \quad (31)$$

**Periodo de retorno.** El periodo de retorno es el tiempo promedio de la recurrencia en años de un sismo que tiene una intensidad  $\geq a$ . Se relaciona con la probabilidad o nivel de excedencia mediante la siguiente expresión:

$$R_y(a) = -\frac{t}{\ln(1-RISK_t)} \quad (32)$$

Donde:

$R_y(a)$  : Periodo de retorno promedio en años de un sismo de intensidad  $\geq a$

$t$  : Tiempo de vida útil

$RISK_t$  : Probabilidad o nivel de excedencia

Los movimientos de diseño que el ingeniero debe seleccionar están asociados a un nivel de excedencia suficientemente pequeño durante la vida útil de la edificación. En la tabla 7 se muestran valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño (Grases, 1989). La selección de los movimientos sísmicos depende del tipo de obra.

En el presente estudio se considera el 90% de nivel de confianza para 100 años de vida útil ( $t$ ) que corresponde a 950 años de período de retorno, es decir el 10% de nivel de excedencia en un periodo de  $t$  años.

Tabla 7. Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño

Tipo de obra	Vida útil (t años)	Probabilidad de Excedencia	Tiempo de Retorno (años)
Instalaciones esenciales con capacidad muy limitada para resistir deformaciones inelásticas y peligro de contaminación (contenedor de reactores nucleares).	50 a 100	0.01	>5,000
Puentes o viaductos de arterias principales.	100	0.10	950
Tanques de almacenamiento de combustible.	30	0.05	590
Edificaciones para viviendas.	50	0.10-0.20	225/500

Fuente: Aguilar y Gamarra (2009)

## 2.2. Definición de términos usados

**Interacción suelo-estructura.** Es la modificación del movimiento del terreno (en la base de la estructura) provocado por la presencia de la estructura.

**Desempeño estructural.** Es el comportamiento que adopta la estructura a nivel de respuesta ante sollicitaciones de cargas de servicio y/o sismo.

**Puente.** Infraestructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles o lagos, la cual está conformada por estribos o pilares extremos, columnas o pilares de apoyo centrales y los cimientos.

**Cargas sísmicas.** Fuerza producida por un movimiento sísmico que se transmite a la sub y superestructura del puente a través del suelo de fundación, la cual ejerce acción dinámica sobre los elementos de la infraestructura.

**Modelo analítico.** Planteamiento numérico en base a las características físicas y mecánicas de los materiales constituyentes del objeto en estudio, que nos permite conocer y comprender la naturaleza del fenómeno a investigar.

**Suelo.** Conjunto de partículas minerales o de materia orgánica en forma de depósito que pueden separarse por medio de una acción mecánica y que incluyen cantidades variables de agua y aire.

**Elastoplástico.** Cualidad de los materiales constituyentes de una estructura que se caracterizan por adoptar un comportamiento elástico lineal hasta un valor de esfuerzo de proporcionalidad, y a partir de ese punto conducirse de modo plástico hasta alcanzar el esfuerzo de rotura.

**Optimización de diseño.** Proceso de mejora continua, que en base a la aplicación de nuevas teorías y al uso de softwares de análisis, propone una solución de carácter estructural a las solicitaciones de esfuerzos producidos por cargas de servicio y/o sismo.

## **2.3. Hipótesis**

### **2.3.1. Hipótesis general**

La interacción suelo-estructura influye en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

### **2.3.2. Hipótesis específicas**

El modelo constitutivo del suelo de Morh-Coulomb contribuye a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

El modelo analítico de Barkan-Savinov contribuye a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

La aplicación del método de elementos finitos en base a los modelos de Mohr-Coulomb y de Barkan-Savinov, permite establecer la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.

## 2.4. Variables

### 2.4.1. Relación entre variables de estudio

Tabla 8. Relación entre variables de estudio

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INSTRUMENTOS
Interacción suelo-estructura	Modificación del movimiento del terreno (en la base de la estructura) provocado por la presencia de la estructura	Modelos de interacción suelo-estructura	Método de los elementos finitos Software de análisis SAP 2000
Desempeño estructural	Comportamiento que adopta la estructura a nivel de respuesta ante sollicitaciones de cargas de servicio y/o sismo	Valores de esfuerzo y deformación	Manual de diseño de puentes del MTC Software de análisis SAP 2000
Cargas sísmicas	Fuerza producida por un movimiento sísmico que se transmite a la sub y superestructura del puente a través del suelo de fundación, la cual ejerce acción dinámica sobre los elementos de la infraestructura	Niveles de aceleración dinámica	Norma peruana sismorresistente E.030 Software de análisis SAP 2000

Fuente: Elaboración propia (2018)

Tabla 9. Cuadro de operacionalización de variables

Título	Hipótesis	Variables	Indicadores	Dimensión
<p><b>INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES CONTINUOS DE CONCRETO ARMADO SOMETIDOS A LA ACCIÓN DE CARGAS SÍSMICAS EN SUELOS ARENOSOS</b></p>	<p>Hipótesis general</p>	<p>Variable general</p>	<p>Indicadores generales</p>	<p>Dimensión de indicadores general</p>
	<p>La interacción suelo-estructura influye en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.</p>	<p>IHG: Interacción suelo-estructura. DHG: Desempeño estructural.</p>	<p>I: Desplazamiento de la estructura del puente. I: Desplazamientos del suelo de cimentación. I: Reacciones sobre la estructura. D: Periodo de vibración de la estructura del puente. D: Derivas de la estructura.</p>	<p>I: <math>\Delta</math>(mm). I: <math>\delta</math> (mm). I: R (Tn). D: <math>T_p</math> (s). D: D (mm).</p>
	<p>Hipótesis específicas</p>	<p>Variables específicas</p>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El modelo constitutivo del suelo de Morh-Coulomb contribuye a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.</li> <li>• El modelo analítico de Barkan-Savinov contribuye a determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.</li> <li>• La aplicación del método de elementos finitos en base a los modelos de Mohr-Coulomb y de Barkan-Savinov, permite establecer la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometido a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos semi densos.</li> </ul>	<p>IHE<sub>1</sub>: Modelo constitutivo del suelo de Morh-Coulomb. DHE<sub>1</sub>: Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural. IHE<sub>2</sub>: Modelo analítico de Barkan-Savinov. DHE<sub>2</sub>: Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural. IHE<sub>3</sub>: Método de elementos finitos. DHE<sub>3</sub>: Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural.</p>		

Fuente: Elaboración propia (2018)

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo y Método de Investigación**

Por la finalidad de la tesis, el estudio se enmarcó en los siguientes tipos de investigación:

##### **3.1.1. Por sus fuentes**

**3.1.1.1. Investigación indirecta o documental:** para el desarrollo de la tesis se recurrió a la información existente de investigaciones desarrolladas en el campo de la interacción suelo-estructura, y al análisis de su implicancia en el desempeño estructural de puentes debido a la acción de cargas dinámicas.

##### **3.1.2. Por sus alcances**

**3.1.2.1. Investigación correlacional:** en la tesis se analizó la relación entre las variables de estudio, es decir la correlación existente entre la interacción

suelo-estructura y el desempeño sísmico de los puentes continuos de concreto armado de comportamiento elastoplástico.

### 3.1.3. Por la naturaleza del tratamiento de sus datos

**3.1.3.1. Investigación cuantitativa:** el estudio es cuantitativo, en razón a que se han postulado hipótesis, por lo tanto, se diseñó un plan de contrastación de las suposiciones en base al análisis de modelos de suelos arenosos semi densos y de estructuras de concreto armado, con la finalidad de medir los conceptos incluidos en las variables a través de sus indicadores.

Por lo manifestado, la tesis se desarrolló en función al tipo de investigación de carácter experimental, transversal, correlacional/causal (Figura 5), cuyo objetivo fue describir las relaciones entre la interacción suelo-estructura y el desempeño sísmico de los puentes continuos de concreto armado.

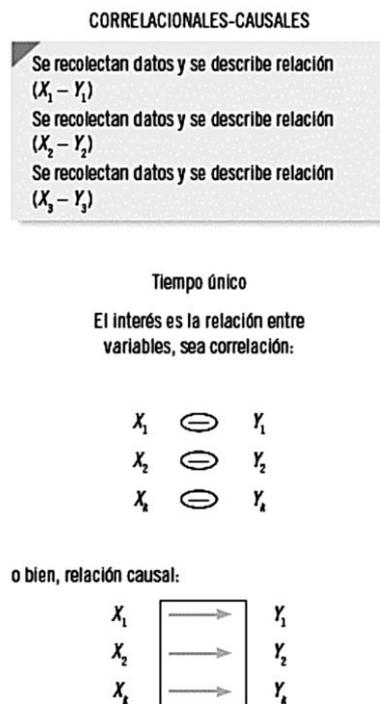


Figura 12. Diseño transeccional correlacional/causal  
Fuente: (Borja, 2012)

### **3.2. Población de estudio**

Con la finalidad de determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño sísmico de puentes, la población y muestra de la investigación estuvo conformada por suelos arenosos semi densos y por estructuras de puentes continuos de concreto armado.

### **3.3. Diseño muestral**

Se establecieron como premisas muestrales de la investigación, la caracterización del suelo arenoso semi denso a través de un modelo analítico y para la estructura del puente continuo de concreto armado en función a un modelo elastoplástico.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas de investigación para el desarrollo de la tesis se enmarcaron en la búsqueda exhaustiva de estudios referentes a la influencia de la interacción suelo-estructura en el diseño de puentes, mediante la recopilación de información de los avances y del estado del arte alcanzados hasta la fecha, tal como se aprecia en el acápite 1.3 referido a los antecedentes relacionados con el tema.

Existen diferentes instrumentos para la recolección de información, las mismas que no son excluyentes y muy por el contrario son complementarias, por tal motivo la técnica empleada en el desarrollo de la investigación fue la recopilación de bases teóricas de modelos de interacción suelo-estructura aplicados al diseño de puentes sobre suelos arenosos semi densos validados mediante la experimentación a nivel de prototipo, publicadas en tesis, revistas de investigación y congresos.

### **3.5. Procedimientos para la recolección de datos**

El procedimiento de recolección de datos utilizados implicó la interrelación entre las siguientes actividades:

- a) Obtención de la información primaria válida y confiable a través de buscadores tales como Journal Citation Reports, JSTOR Archive, MathEduc, ProQuest, etc.
- b) Obtención de resultados de desplazamientos (en la estructura y el suelo) y reacciones (sobre la estructura) producto de la experimentación en base a modelos analíticos mediante un sistema de adquisición de datos.

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Una vez recopilada la información teórica y experimental se procedió al análisis de estas, para determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes debido a la acción de cargas sísmicas, con la finalidad de plantear criterios de optimización que rigen el de diseño estructural de puentes continuos de concreto armado. Así mismo, se adaptaron los resultados de desempeño (obtenidos mediante softwares de análisis estructural y hojas en excel) a las normas y códigos estructurales del país.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1. Resultados**

El puente modelo idealizado para el desarrollo de la investigación está conformado por dos estribos laterales y una pila central, la cual se apoya una viga postensada tipo cajón y losa de concreto armado. Se presenta inicialmente en forma esquemática los grados de libertades principales y secundarias, así como sus nudos y elementos que conforman la estructura. Mediante SAP 2000, se calculó la matriz de rigidez lateral tomando en cuenta la rigidez de traslación y rotación de la cimentación mediante fórmulas propuestas por el Manual de puentes del MTC.

Como se manifestó en capítulos anteriores la respuesta dinámica en la interacción suelo-estructura, depende de las propiedades geométricas de la cimentación y de acuerdo con el tipo de suelo, se tendrá la amplificación de la onda sísmica, por lo tanto, una mayor excitación sobre la estructura.

Analíticamente se estudió la influencia de las zapatas de la cimentación y los pilotes como estructuras que servirán de apoyo a nuestra pila central del puente, variando los periodos de vibración y sus aceleraciones tomando en cuenta las rigideces traslacional y rotacional, como efecto de la interacción suelo-estructura.

#### 4.1.1. Geometría del puente

El puente consta de una viga postensada, cuya sección transversal es tipo cajón, de 33.52 metros de longitud, dos estribos laterales y una pila central de 5.50 m de altura. A continuación, se presenta un corte longitudinal con el esquema general de la cimentación:

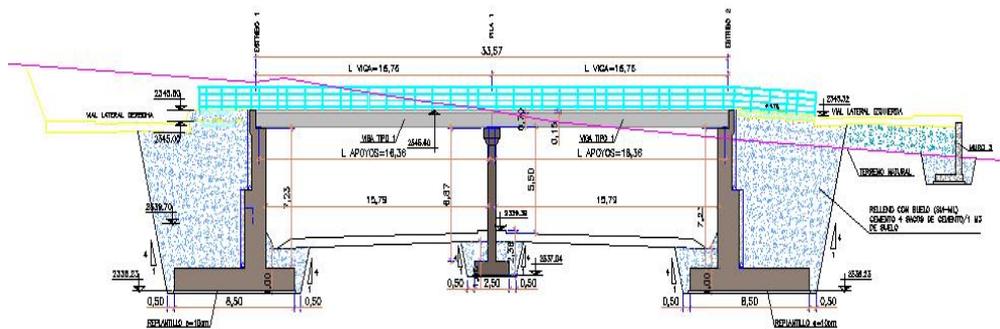


Figura 13. Vista longitudinal del puente  
Fuente: Elaboración propia (2019)

#### 4.1.2. Análisis estructural del puente

El puente se forma de acuerdo con un modelo de pórtico simplemente apoyado con una pila central rígida en su centro de luz, para iniciar el análisis se enumeran los nudos y sus elementos.

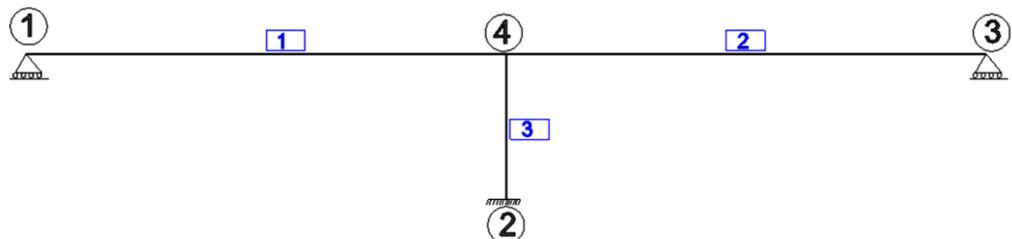


Figura 14. Numeración de nudos y elementos  
Fuente: Elaboración propia (2019)

En la figura 15, se muestra el modelo con sus grados de libertad; coordenadas principales y secundarias, cabe notar, que la coordenada número cinco es la principal y representa el desplazamiento longitudinal del puente.

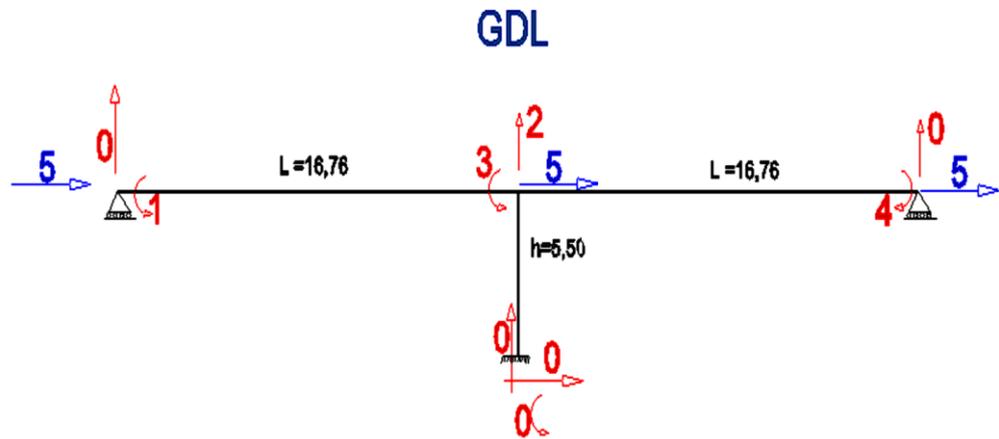


Figura 15. Grados de libertad y modelo de masas concentradas  
Fuente: Elaboración propia (2019)

Tomando en cuenta el efecto de interacción suelo estructura el modelo de masas concentradas resulta:

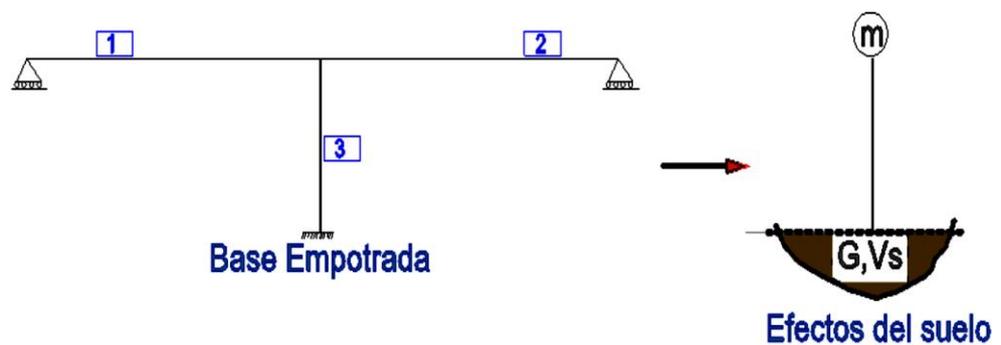


Figura 16. Modelo de masa concentrada con efecto del suelo de cimentación  
Fuente: Elaboración propia (2019)

Una vez que se simplifica el modelo de varios grados de libertad a un solo grado de libertad se conforma el modelo de péndulo invertido con las rigideces  $K_d$ ,  $K_r$  y  $K_l$  de la pila calculada como apoyo rígido.

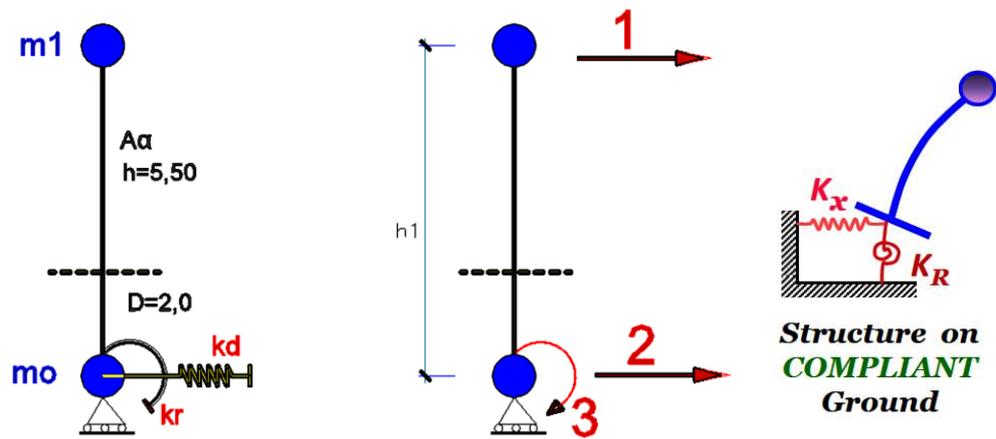


Figura 17. Modelo de masas concentradas y efecto de interacción suelo-estructura  
Fuente: Elaboración propia (2019)

Se procede al cálculo de rigideces de la zapata de cimentación, para lo cual se idealiza el modelo de cálculo de la subestructura de acuerdo al manual de puentes del MTC.

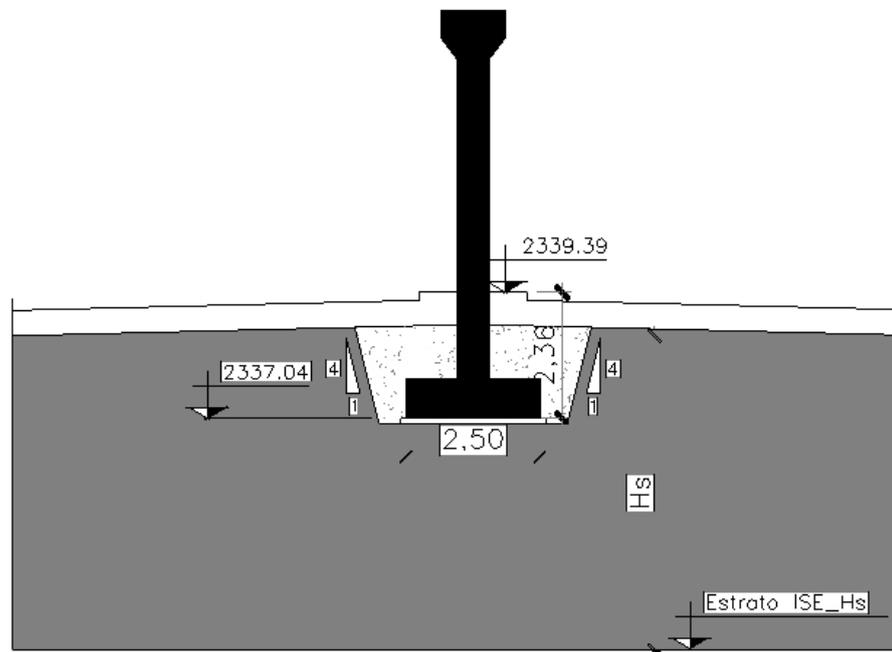


Figura 18. Zapata de cimentación para la pila central del puente  
Fuente: Elaboración propia (2019)

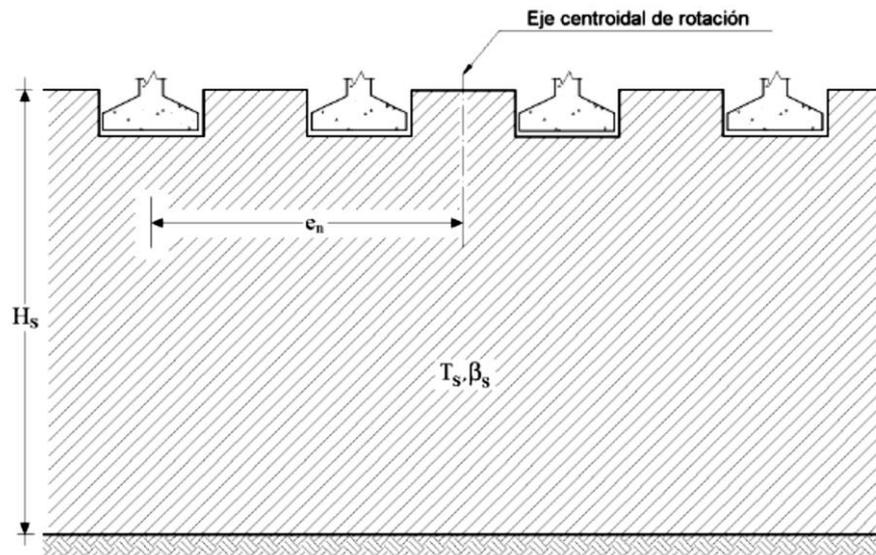


Figura 19. Modelo de cimentación con zapatas ISE  
Fuente: Elaboración propia (2019)

A fin de simplificar el análisis, para el cálculo de la rigidez horizontal y rotacional se utilizaron las fórmulas del manual de puentes del MTC.

$$Kh = \frac{8Gs \cdot Rh}{2 - \nu} \left(1 + \frac{1Rh}{2Hs}\right) \left(1 + \frac{2D}{3Rh}\right) \left(1 + \frac{5D}{4Hs}\right) \quad (33)$$

$$Kr = \frac{8Gs \cdot Rr^3}{3(1 - \nu)} \left(1 + \frac{1Rr}{6Hs}\right) \left(1 + \frac{2D}{Rr}\right) \left(1 + 0.71 \frac{D}{Hs}\right) \quad (34)$$

Donde:

$B$  = Anch o de la viga de cimentación

$L$  = Longitud de la viga o zapata de cimentación

$D$  = Desplante de cimentación

$Hs$  = Profundidad del estrato del suelo

$\nu$  = Modulo de Poisson

$Vs$  = Velocidad de onda de corte

$G = (Vs)^2 * \gamma$

Con el cálculo de la rigidez lateral del puente con base empotrada, más las rigideces adicionales por efectos de suelo, se forma la matriz de rigidez completa y se muestra a continuación:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_E & 0 & 0 \\ 0 & K_h & 0 \\ 0 & 0 & K_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 3999.96 & 0 & 0 \\ 0 & 52746000 & 0 \\ 0 & 0 & 1149600 \end{bmatrix}$$

La matriz de masas se obtiene a partir de la energía cinética y mediante el trazado del diagrama de velocidades se reemplaza en las ecuaciones de energía y se determina los términos respectivos de la matriz M. La energía cinética de una estructura T, es igual a la energía cinética de traslación más energía cinética de rotación.

$$T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\theta^2 \quad (35)$$

$$T = \frac{1}{2}[m_1q_1^2 + (m_1 + m_0)q_2^2 + (m_1 + m_0J)q_3^2 + 2m_1q_1q_2 + 2m_1q_2q_3h_1 + 2m_1q_1q_3h_1] \quad (36)$$

Dónde:

m=masa

v=velocidad lineal de traslación

J=Momento de inercia de la masa

$\theta$ =Velocidad angular

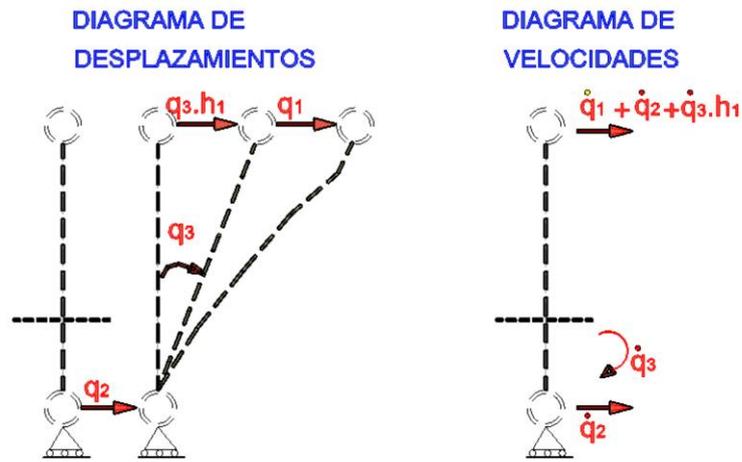


Figura 20. Diagrama de desplazamientos y velocidades  
Fuente: Elaboración propia (2019)

$$T = \frac{1}{2} \left[ m_1 \dot{q}_1^2 + (m_1 + m_o) \dot{q}_2^2 + (m_1 + m_o J) \dot{q}_3^2 + 2m_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2m_1 h_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + 2m_1 h_1 \dot{q}_1 \dot{q}_3 \right]$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 & m_1 + m_o & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1 & (m_1 + m_o J) h_1^2 \end{bmatrix}$$

1      1/2

Figura 21. Conformación de la matriz de masas  
Fuente: Elaboración propia (2019)

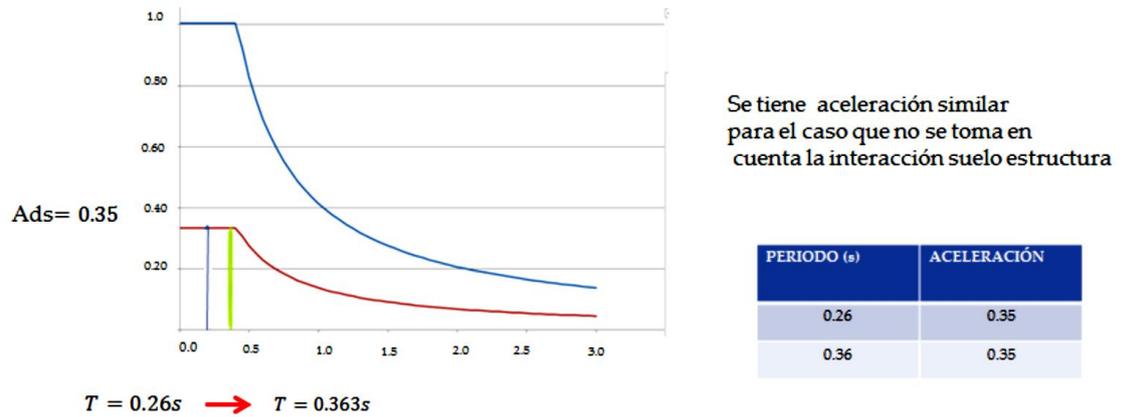
Por lo tanto, la matriz de masas resulta:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 & m_1 + m_o & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1 & (m_1 + m_o J) h_1^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 11.040 & 11.040 & 85.039 \\ 11.040 & 13.150 & 85.039 \\ 85.039 & 85.039 & 780.17 \end{bmatrix}$$

Mediante el programa SAP 2000, se calculó el periodo fundamental del puente. El periodo calculado resulta  $T=0.363s$ , que es mayor al calculado sin tomar la interacción suelo-estructura que fue de  $0.260s$ , sin embargo, la aceleración se mantiene constante por la forma del espectro de diseño.

Figura 22. Espectro de diseño del puente



Fuente: Elaboración propia (2019)

Se ha considerado, para efectos de comparación teórica la pila central del puente cimentada sobre una base y está apoyada sobre cuatro pilotes, tal como se muestra geoméricamente a continuación:

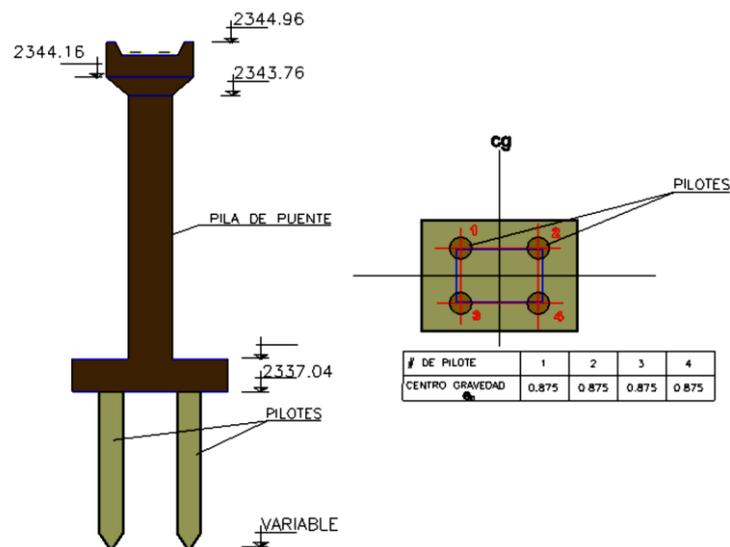


Figura 23. Modelo de cimentación con pilotes

Fuente: Elaboración propia (2019)

Para el cálculo de las rigideces horizontal, vertical y rotacional del grupo de pilotes se utilizaron las siguientes formulas del manual de cimentaciones:

$$K_{hn} = d \cdot Es \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.21} \quad (37)$$

$$K_{vn} = 1.9d \cdot Es \left( \frac{L_p}{d} \right)^{0.21} \quad (38)$$

$$K_h = \sum_{i=1}^n K_{hn} \quad (39)$$

$$K_r = \sum_{i=1}^n e^2 K_{vn} \quad (40)$$

Aplicando las consideraciones de energía cinética descritas anteriormente se forma la matriz de masas del sistema pila central y pilotes de cimentación, tal como se muestra a continuación:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 & m_1 + m_0 & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1 & (m_1 + m_0 J) h_1^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 11.040 & 11.040 & 85.039 \\ 11.040 & 13.150 & 85.039 \\ 85.039 & 85.039 & 2570.2 \end{bmatrix}$$

Con el programa SAP 2000, se calcula el periodo fundamental del puente, resultando  $T=0.59s$ , sin embargo, se reduce la aceleración a  $0.22g$  debido a la influencia del suelo sobre la cimentación con pilotes.

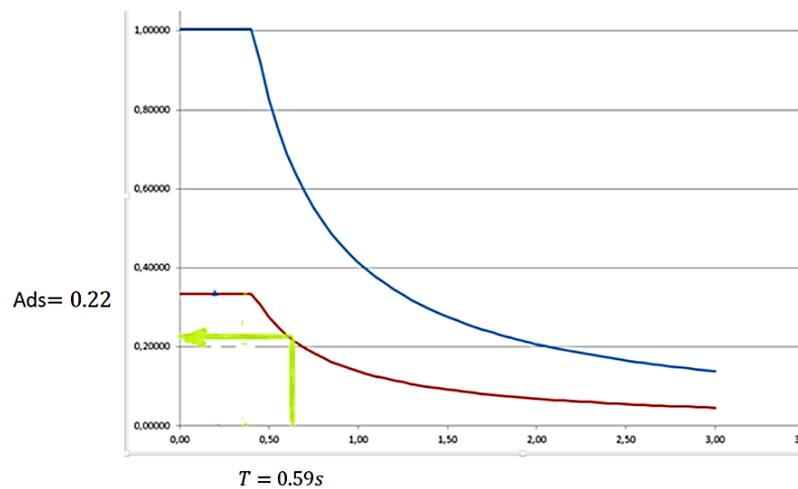


Figura 24. Espectro de diseño del puente-pilotes  
Fuente: Elaboración propia (2019)

## 4.2. Análisis de resultados

A continuación, se analizan y discuten los resultados obtenidos luego de la evaluación de la estructura del puente considerando la interacción suelo-estructura mediante la aplicación del modelo analítico de Barkan-Savinov, a través del análisis estructural por elementos finitos:

Para el caso en que la cimentación de la pila central del puente se apoya directamente sobre el suelo de fundación, se observa que el periodo fundamental del puente aumenta de 0.260s a 0.363s, sin embargo, la aceleración se mantiene constante en 0.35g por la forma del espectro de diseño correspondiente a sismos de periodos cortos, este efecto es muy importante, ya que es el caso de los espectros de diseño característicos de los eventos sísmicos de las ciudades costeras del Perú.

Cuando la cimentación de la pila central del puente se apoya sobre pilotes y con la inmersión en el análisis de la interacción suelo-estructura, se observa, que aumenta el periodo de vibración a 0.56s, sin embargo, se tiene menor aceleración (0.22g), demostrando que el suelo contribuye a una mejor distribución de esfuerzos

en todos los elementos estructurales, mediante la disipación de cierto porcentaje de energía inducida por el sismo de diseño.

La rigidez dinámica y el amortiguamiento de los pilotes dependen de la interacción suelo-estructura y son gobernados por cuatro parámetros adimensionales (la relación de masas, la relación de velocidades de onda, la relación de esbelteces y la relación de cargas).

Es necesario verificar el estado límite de servicio asociado a las aceleraciones verticales, ya que constituye uno de los principales problemas que se presenta en el diseño del puente objeto de estudio.

Para aplicar las fórmulas de Kausel y Milonaquis, se deberá corregir el valor del módulo de rigidez al corte ( $G$ ), y el valor por el desplante de la fundación, por efectos de amortiguamiento del suelo tal como lo estipula el ASCE 7 2010 y FEMA 440.

De los resultados se establece, que la respuesta dinámica en la interacción suelo-estructura, depende directamente de las propiedades geométricas de la subestructura (sección y peralte de las zapatas), y de acuerdo con el tipo de suelo de fundación, se obtendrá la amplificación de la onda sísmica, lo que conlleva a una mayor excitación dinámica en la superestructura.

La interacción suelo-estructura, puede ocasionar considerables incrementos o reducciones de la respuesta estructural, dependiendo de la relación entre los periodos fundamentales de la estructura y el sitio. Específicamente, cuando el periodo efectivo del sistema suelo-estructura se acerca al dominante del suelo tiene lugar el fenómeno de resonancia, haciendo que la respuesta estructural sea excepcionalmente elevada.

Para la estimación de la rigidez de empotramiento se debe considerar la rigidez del estrato y no la rigidez ponderada, ya que esta es el promedio del semi espacio de amplificación que modifica al espectro, pero no a las condiciones de empotramiento.

Se determinó que los principales efectos de la interacción dinámica suelo-estructura (IDSE) son la adición de flexibilidad y modificación de amortiguamiento a la estructura a través de su cimentación. Por lo tanto, la variación de la ductilidad del sistema y periodo de la estructura debido a la IDSE generan efectos en la respuesta estructural, los cual debe ser analizado en todos los diseños estructurales de puentes con el objetivo de predecir su comportamiento lo más cercano a la realidad.

Se observó que los efectos de IDSE se vuelven desfavorables cuando los desplazamientos producen efectos de segundo orden (efecto P-delta), los cuales en estructuras esbeltas son preponderantes; por tal motivo estos deben ser controlados dotando a la estructura de mayor rigidez.

La diferencia entre los movimientos de entrada a la cimentación y los movimientos en campo libre dan lugar a la disipación de energía vía refracción de ondas sísmicas y vía amortiguamiento histerético del suelo; Esta disipación de energía afecta al amortiguamiento del sistema en conjunto, los cuales son atribuidos a la acción inercial.

Los efectos de interacción cinemática tienden a ser importantes para puentes con periodos fundamentales relativamente cortos, y se produce por el cambio de impedancias que existe entre la cimentación y el suelo de fundación que modifica a la condición de apoyo de la estructura.

Los resultados demostraron, que la interacción dinámica suelo-estructura modifica la respuesta natural de un sistema estructural debido que el suelo de alguna manera altera no sólo las condiciones de apoyo que se pueden suponer inicialmente fijas, sino también la flexibilidad y el amortiguamiento total del sistema. Debido a que el suelo no produce ni empotramiento perfecto ni libertad total en la cimentación, el problema básicamente consiste en determinar cómo se ven afectadas las propiedades dinámicas del sistema analizado.

Finalmente, la evaluación estructural demostró que la interacción suelo-estructura de carácter dinámico se produce debido a la presencia de un elemento extraño para el suelo (cimentación) modificando de esta forma el movimiento en campo libre por la generación de ondas difractadas, la cual transmite sus efectos a la superestructura a nivel de parámetros dinámicos (frecuencia natural, periodo de vibración).

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

La interacción suelo-estructura nos permitió determinar simultáneamente el comportamiento del suelo de fundación con la estructura del puente frente a eventos sísmicos, demostrando que ante tal escenario el suelo coadyuva a una mejor distribución de esfuerzos en todos los elementos estructurales, mediante la disipación de cierto porcentaje de energía inducida por un sismo.

Se demostró que el suelo de fundación interactúa de manera conjunta con la estructura del puente, obteniéndose resultados que describen el verdadero comportamiento de este frente a un evento sísmico mediante la utilización de los parámetros que nos brinda el estudio de mecánica de suelos y que muchas veces algunos de ellos no se toman en cuenta en un modelamiento común que no considera interacción suelo-estructura.

El modelo constitutivo del suelo de Morh-Coulomb permite asegurar que el comportamiento del suelo no era lineal, sino más bien presenta un comportamiento tipo amortiguador con resorte y es inelástico. De acuerdo con estas características, se logra una mejor redistribución de todos los esfuerzos, presentando un mejor comportamiento con la estructura del puente.

La aplicación del modelo analítico de interacción suelo-estructura de Barkan-Savinov, a través del análisis de elementos finitos, muestra que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en la determinación de los parámetros de cálculo de la estructura del puente, tales como desplazamiento lateral, fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima y momento flector, lo que permite establecer criterios de optimización de diseño a nivel de resistencia, rigidez o fatiga; y por ende una metodología de diseño estructural de puentes cimentados sobre suelos arenosos semidensos.

La investigación demuestra la importancia y necesidad de incluir en los diseños sísmicos los efectos de IDSE debido a que un cambio de impedancia en los suelos de cimentación medidos mediante cambios de rigideces produce cambios significativos de comportamiento, es de esta forma que un suelo con una rigidez mayor (mayor velocidad de onda de corte) tiene menores desplazamientos producto de la interacción y hace que el control de deformaciones (curvatura de control de daño) mediante rigideces sea menor, en comparación con suelos de cimentación con rigideces bajas las cuales producen mayores desplazamientos elásticos por IDSE y el control de desplazamientos para evitar efectos de segundo orden es mayor lo que se traduce en la adición de rigidez a la estructura lo cual ocasiona mayores cuantías que den solución a los problemas existentes.

La interacción dinámica suelo-estructura se ocupa de la consideración del sistema suelo-estructura como un todo cuya respuesta dinámica debe ser determinada. No puede suponerse que estructuras de gran responsabilidad que se apoyan o cimientan en el suelo se encuentran unidas a un medio indeformable ya que la deformabilidad del suelo no sólo es evidente, sino que además de ella depende la respuesta del conjunto y por tanto de la estructura sobre él cimentada.

## **5.2. Recomendaciones**

Para modelar correctamente el problema de la interacción suelo-estructura, se debe tener en cuenta el tamaño y forma del terreno, así como también una adecuada precisión de la malla y tipo de análisis estructural a realizar.

Es necesario incluir en el modelo de forma adecuada tanto pilas, estribos, como el terreno que los soporta, de modo que se tengan en cuenta en el análisis todos los mecanismos resistentes y disipativos involucrados, tales como: masas, rigideces y amortiguamientos.

Realizar el cálculo sísmico con ayuda de los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura, ya que nos muestra que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en la determinación de los parámetros de cálculo. Como son el período de la primera forma de vibración, frecuencia natural, desplazamientos máximos, fuerzas axiales y cortantes máximas.

Como futuras líneas de investigación es recomendable realizar estudios en base a la variación frecuencial de interacción suelo-estructura según la profundidad; así como también, el análisis de la influencia de la IDSE de estructuras cimentadas en suelos de características geomecánicas distintas a las de la arena semi densa.

## Referencias bibliográficas

- Aguilar Z., Gamarra, C. (2009). *Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú*. Tesis de ingeniero civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Alejandro, J. (2017). *Caracterización y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*. Tesis de doctor en ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán.
- Apuntes ingeniería civil (2018). Interacción Suelo-Estructura. Recuperado de <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2014/03/interaccion-suelo-estructura.html>.
- Avilés, J. et al, (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Ingeniería Sísmica*, 4 (71), 1-36.
- Borja, M. (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. 1ra. Edición. Editorial Ibáñez. Chiclayo.
- Canales, A. (2005). *Programa didáctico de ayuda a la secuela del diseño de cimentaciones superficiales*. Tesis de licenciatura ingeniería civil. Universidad de las Américas, Puebla.
- Canavesio, O. et al, (2011). *Interacción dinámica suelo estructura en puentes*. Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería. Universidad de Tucumán, Tucumán.
- Cañizares, F., Aguiar R. (2017). *Análisis de puente peatonal con interacción suelo- estructura*. Trabajo de investigación. Instituto de Ingeniería Sísmica de la Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador, Pichincha.
- Fernández, L. (2013). Influencia de la interacción dinámica suelo-estructura en la respuesta dinámica de las estructuras. *Ingeniería*, 10 (5), 20-23.

- Galicia, W., León J. (2007). *Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones de albañilería confinada con plateas de cimentación*. Tesis de ingeniero civil. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo.
- Herrera, L. (2013). *Evaluación de la interacción dinámica suelo-estructura de edificaciones construidas en ladera*. Tesis de maestría en ingeniería geotécnica. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Jaramillo, S. (2004). *Geotécnica y Cimientos: Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia*. Madrid: Rueda.
- Martínez, J. (2014). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento dinámico de estructuras sometidas al paso de cargas móviles*. Tesis en ingeniería aeroespacial. Universidad de Sevilla.
- Mesa, C. (2005). *Análisis del comportamiento de estructuras de puentes ante solicitaciones sísmicas dependiendo de la tipología de la cimentación y la interacción suelo-estructura*. Tesis de la escuela superior de ingenieros. Universidad de Sevilla.
- Nielson, B., DesRoches, R. (2007). *Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach*. Earthquake Engng Struct. Dyn.
- Nielson, B. (2005). *Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones*. Tesis de Doctorado. Instituto de Tecnología de Georgia – USA, Georgia.
- Olarte, J. (2009). *Espectros de diseño considerando interacción dinámica suelo estructura*. Tesis de ingeniería civil. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Pérez, J. (2012). *Interacción suelo-estructura utilizando el método de elementos finitos*. Tesis de maestría en geotecnia. Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal.

- Priestley, M., et al, (2007). *displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press. Pavia.
- Priestley, M. et al, (1996). *seismic design and retrofit of bridges*. A Wiley Interscience Publication. New York.
- Rodríguez, J. (2005). Análisis de interacción suelo o estructura para refuerzo de suelos fisurados. *Ingeniería y Universidad*, 9(2). Recuperado de <http://4www.redalyc.org/articulo.oa?id=47790204>.
- Rojas, E. (2009). *Diseño directo basado en desplazamientos para puentes con interacción suelo estructura*. Tesis de título de ingeniero civil. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Soriano, A. (1989). Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Jornadas técnicas sobre ingeniería sísmica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos. Barcelona, 21-22 marzo.
- Suescum, D. (2016). *Influencia de la interacción suelo estructura en la respuesta dinámica de puentes de ferrocarril de luces cortas*. Tesis de máster en ingeniería de caminos, canales y puertos. Universidad de Sevilla.
- Taylor, D. (2007). *Calibración del modelo del puente Marga Marga considerando variación espacial del movimiento sísmico a nivel de cepa y estribo*. Tesis de título de ingeniero civil. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Valderrama, C., Meza J. (2014). *Influencia de la interacción suelo estructura en la reducción de esfuerzos de una edificación aporticada con zapatas aisladas*. Tesis de título de ingeniero civil. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima.
- Vergara, N. (2008). *Efectos de la interacción suelo estructura en los espectros de respuesta*. Tesis de ingeniería civil. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- Vidaud, E., Ayala G. (2014). *Criterios de modelación de puentes de concreto reforzado con fines de evaluación por desempeño y de análisis estructural*. Trabajo de Investigación. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Villarreal, G. (2006). *Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas*. 1ra. Edición. ISBN 9972-33-242-X. Lima.
- Villarreal, G. (2005). *Interacción sísmica suelo-pilote-superestructura en edificios altos*. 1ra. Edición. ISBN 9972-33-175-X. Trujillo.

# **ANEXOS**