



# **UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON MENCIÓN EN  
CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES

**Influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la  
respuesta sísmica de la subestructura con aisladores en el puente  
terminal portuario de Chancay**

## **TESIS**

Para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería Vial con Mención  
en Carreteras, Puentes y Túneles

## **AUTOR**

Bachiller Cutti Huamani, Jean Marcos

(ORCID: 0000.0003.1558.0717)

## **ASESOR**

Doctor Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

(ORCID: 0000.0002.8873.189X)

**Lima, Perú**

**2022**

## **Metadatos Complementarios**

### **Datos de autor**

Cutti Huamani, Jean Marcos

Tipo de documento de identidad del AUTOR: DNI

Número de documento de identidad del AUTOR: 47525411

### **Datos de asesor**

Doctor Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

Tipo de documento de identidad del ASESOR: DNI

Número de documento de identidad del ASESOR: 07065758

### **Datos del jurado**

JURADO 1: Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno, DNI N°07410234,  
ORCID 0000.0003.0512.8954

JURADO 2: Doctor Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel, DNI N°31615859,  
ORCID 0000.0002.4568.9759

JURADO 3: Doctor Altamirano Herrera, Aníbal, DNI N°10426902, ORCID  
0000.0003.2940.0078

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 732527

Código del Programa: 2.01.05

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Justina Huamaní de la Cruz y Casimiro Cutti Leiva, por su constante apoyo, cariño y amor brindado durante toda mi vida; sus ganas de superación y esfuerzos que me ayudan a desarrollarme como persona y profesional.

**AGRADECIMIENTO**

A mi asesor, Dr. Valencia Gutiérrez, Avelino, por su dedicación y apoyo condicional para el desarrollo de mi tesis.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. Planteamiento del estudio.....	17
1.1 Descripción del problema.....	17
1.2 Formulación del problema.....	19
1.2.1 Problema general .....	19
1.2.2 Problemas específicos .....	19
1.3 Importancia y justificación del estudio.....	19
1.3.1 Importancia.....	19
1.3.2 Justificación.....	20
1.4 Delimitación del estudio.....	22
1.5 Objetivos de la investigación.....	23
1.5.1 General.....	23
1.5.2 Específicos .....	23
2. Marco teórico .....	24
2.1 Marco histórico.....	24
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema .....	26
2.2.1 Investigaciones nacionales.....	26
2.2.2 Investigaciones internacionales.....	30
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	33
2.3.1 Marco Normativo.....	33
2.3.2 Interacción suelo estructura .....	33
2.3.3 Modelamiento numérico de la estructura.....	41
2.3.4 Análisis estructural.....	45
2.3.5 Respuestas sísmicas de la subestructura .....	46
2.3.6 Aisladores.....	46
2.4 Definición de términos básicos .....	59
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis .....	59
2.6 Hipótesis .....	60
2.6.1 General.....	60

2.6.2	Específicas.....	60
2.7	Variables .....	61
3.	Marco metodológico .....	63
3.1	Tipo, método de investigación y diseño de la investigación .....	63
3.1.1	Tipo de investigación .....	63
3.1.2	Método de investigación.....	63
3.1.3	Diseño investigación .....	63
3.2	Población y muestra .....	64
3.2.1	Población.....	64
3.2.2	Muestra .....	64
3.3	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	64
3.3.1	Técnicas de recolección de datos .....	64
3.3.2	Instrumentos .....	65
3.3.3	Validez de instrumentos .....	65
3.4	Descripción de procedimientos de análisis de datos .....	65
4.	Resultados .....	66
4.1	Resultados .....	66
4.1.1	Descripción del modelo.....	66
4.1.2	Metodología del estudio (esquema de secuencia de procedimientos) .....	82
4.1.3	Resultados en la respuesta sísmica de las subestructuras .....	83
4.2	Discusión de Resultados.....	96
4.2.1	Efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura aislados sísmicamente. ....	96
4.2.2	Efectos del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente.....	96
4.2.3	Efectos del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura del puente .....	97
4.2.4	Efectos del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente .....	97
5.	Conclusiones y recomendaciones .....	99
5.1	Conclusiones .....	99
5.2	Recomendaciones .....	100
6.	Referencias bibliográficas .....	101
7.	Anexos .....	104

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> .....	61
<i>Operacionalización de las variables</i> .....	61
<b>Tabla 2:</b> .....	68
<i>Litoestratigrafía</i> .....	68
<b>Tabla 3:</b> .....	68
<i>Parámetros de resistencia</i> .....	68
<b>Tabla 4:</b> .....	71
<i>Propiedades de los materiales del puente</i> .....	71
<b>Tabla 5:</b> .....	81
<i>Valores de <math>f</math> en función de la densidad relativa del suelo</i> .....	81
<b>Tabla 6:</b> .....	83
<i>Desplazamiento del análisis espectral (mm)</i> .....	83
<b>Tabla 7:</b> .....	84
<i>Periodo fundamental(s)</i> .....	84
<b>Tabla 8:</b> .....	85
<i>Fuerzas cortantes basales (kN)</i> .....	85
<b>Tabla 9:</b> .....	88
<i>Momentos flectores basales (kN*m)</i> .....	88
<b>Tabla 10:</b> .....	91
<i>Desplazamiento relativo del aislador(mm)</i> .....	91
<b>Tabla 11:</b> .....	93
<i>Fuerzas sísmicas del aislador(kN)</i> .....	93

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> .....	34
<i>Tipos de cimentación en puentes (superficial y profunda)</i> .....	34
<b>Figura 2:</b> .....	35
<i>Pilotes de acero de sección H</i> .....	35
<b>Figura 3:</b> .....	36
<i>Pilotes de concreto</i> .....	36
<b>Figura 4:</b> .....	36
<i>Pilotes de madera</i> .....	36
<b>Figura 5:</b> .....	37
<i>Proceso constructivo-Hincado de pilotes</i> .....	37
<b>Figura 6:</b> .....	38
<i>Pilote en fricción</i> .....	38
<b>Figura 7:</b> .....	40
<i>Deflexión de curva de pilote</i> .....	40
<b>Figura 8:</b> .....	40
<i>Resistencia lateral de suelo de acuerdo a curva “p-y” en profundidad x.</i> .....	40
<b>Figura 9:</b> .....	41
<i>Diagrama de flujo del modelamiento numérico a ejecutar en un diseño</i> .....	41
<b>Figura 10:</b> .....	42
<i>Representación idealizada de un sistema en elementos finitos.</i> .....	42
<b>Figura 11:</b> .....	43
<i>Representación gráfica de los elementos fñitos 1D, 2D y 3D</i> .....	43
<b>Figura 12:</b> .....	44
<i>Modelación de la estructura de puente Terminal Portuario de Chancay</i> .....	44
<b>Figura 13:</b> .....	45
<i>Modelación tipo de barra según estratos perforados.</i> .....	45
<b>Figura 14:</b> .....	45
<i>Proceso de análisis estructural para una estructura</i> .....	45
<b>Figura 15:</b> .....	47
<i>Efecto de flexibilidad del aislamiento sísmico</i> .....	47
<b>Figura 16:</b> .....	48
<i>Efecto de disipación de energía por aislamiento sísmico.</i> .....	48
<b>Figura 17:</b> .....	48
<i>Energía de disipación del aislador sísmico</i> .....	48
<b>Figura 18:</b> .....	49
<i>Representación de un grado de libertad con y sin aislador</i> .....	49



<b>Figura 19:</b> .....	52
<i>Espectro sísmico con aislador</i> .....	52
<b>Figura 20:</b> .....	54
<i>Curva histerética en aisladores elastoméricos</i> .....	54
<b>Figura 21:</b> .....	55
<i>Efecto de péndulo representativo para aisladores de tipo deslizamiento</i> .....	55
<b>Figura 22:</b> .....	56
<i>Aislador de base con núcleo de plomo LRB</i> .....	56
<b>Figura 23:</b> .....	57
<i>Comportamiento histerético del sistema LRB</i> .....	57
<b>Figura 24:</b> .....	58
<i>Sistema HDRB de aislamiento</i> .....	58
<b>Figura 25:</b> .....	58
<i>Comportamiento histerético del sistema HDRB</i> .....	58
<b>Figura 26:</b> .....	60
<i>Mapa conceptual de fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.</i> .....	60
<b>Figura 27:</b> .....	66
<i>Geología local y planta de los perfiles geológicos - geotécnicos.</i> .....	66
<b>Figura 28:</b> .....	67
<i>Perfil geológico - geotécnico: sección A – A</i> .....	67
<b>Figura 29:</b> .....	67
<i>Perfil geológico - geotécnico: sección B – B</i> .....	67
<b>Figura 30:</b> .....	68
<i>Perfil geológico - geotécnico: sección C – C</i> .....	68
<b>Figura 31:</b> .....	69
<i>Planta de puente</i> .....	69
<b>Figura 32:</b> .....	70
<i>Elevación de puente</i> .....	70
<b>Figura 33:</b> .....	71
<i>Sección transversal de puente</i> .....	71
<b>Figura 34:</b> .....	72
<i>Espectro de respuesta según Manual del MTC</i> .....	72
<b>Figura 35:</b> .....	74
<i>Hoja de cálculo para el Espectro sísmico longitudinal del puente TPCH</i> .....	74
<b>Figura 36:</b> .....	75
<i>Hoja de cálculo para el Espectro sísmico transversal del puente TPCH</i> .....	75
<b>Figura 37:</b> .....	76

<i>Espectro sísmico compuesto para puentes aislados</i> .....	76
<b>Figura 38:</b> .....	77
<i>Hoja de cálculo de espectros longitudinales para diferentes amortiguamientos</i> .....	77
<b>Figura 39:</b> .....	78
<i>Hoja de cálculo de espectros transversales para diferente amortiguamiento</i> .....	78
<b>Figura 40:</b> .....	79
<i>Definición de la geometría en 3D-Base empotrada</i> .....	79
<b>Figura 41:</b> .....	80
<i>Definición de la geometría en 3D-Base flexible</i> .....	80
<b>Figura 42:</b> .....	82
<i>Coeficientes de balasto horizontal</i> .....	82
<b>Figura 43:</b> .....	84
<i>Gráfico de barras del periodo fundamental(s)</i> .....	84
<b>Figura 44:</b> .....	86
<i>Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V2 (kN) en Dir. X</i> .....	86
<b>Figura 45:</b> .....	86
<i>Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V3 (kN) en Dir. X</i> .....	86
<b>Figura 46:</b> .....	87
<i>Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V2 (kN) en Dir. Y</i> .....	87
<b>Figura 47:</b> .....	87
<i>Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V3 (kN) en Dir. Y</i> .....	87
<b>Figura 48:</b> .....	89
<i>Gráfico de barras de Momentos flectores M3 (kN*m) en Dir. X</i> .....	89
<b>Figura 49:</b> .....	89
<i>Gráfico de barras de Momentos flectores M2 (kN*m) en Dir. X</i> .....	89
<b>Figura 50:</b> .....	90
<i>Gráfico de barras de Momentos flectores M3 (kN*m) en Dir. Y</i> .....	90
<b>Figura 51:</b> .....	90
<i>Gráfico de barras de Momentos flectores M2 (kN*m) en Dir. Y</i> .....	90
<b>Figura 52:</b> .....	92
<i>Gráfico de barras desplazamiento en el aislador (mm) en Dir. X</i> .....	92
<b>Figura 53:</b> .....	92
<i>Gráfico de barras desplazamiento en el aislador (mm) en Dir. Y</i> .....	92
<b>Figura 54:</b> .....	94
<i>Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V2 (kN) en Dir. X</i> .....	94
<b>Figura 55:</b> .....	94
<i>Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V3 (kN) en Dir. X</i> .....	94

<b>Figura 56:</b> .....	95
<i>Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V2 (kN) en Dir. Y</i> .....	95
<b>Figura 57:</b> .....	95
<i>Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V3 (kN) en Dir. Y</i> .....	95

## RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló el estudio del papel de la interacción suelo-estructura (SSI) en la respuesta sísmica de puentes aislados. Se utilizaron modelos elásticos para modelar el sistema de aislamiento, dentro de los cuales se observan un empotramiento perfecto y un sistema de suelo flexible. Se consideró que el comportamiento del pilar es lineal y el sistema de cimentación se modela con barras y resortes que representan el pilote y la rigidez lateral del suelo respectivamente. Se consideró como puente de estudio al puente Terminal Portuario de Chancay, que representa a sistemas de pasos elevados altos y flexibles de carreteras con tramos múltiples. Se empleó un análisis espectral lineal. Los resultados de estos análisis numéricos integrales muestran que la interacción suelo-estructura provoca mayores derivas del sistema de aislamiento y menores fuerzas sísmicas en el aislador, (aproximadamente 35% y 25% respectivamente), y en la mayoría de casos, menores cortantes y momentos en la base de los pilares (aproximadamente 20% y 25% en la dirección “X” e “Y” respectivamente) en comparación con los puentes de pilares empotrados sin SSI.

**Palabras claves:** Interacción suelo-estructura, aisladores sísmicos, pilotes, respuestas sísmicas

## ABSTRACT

In the present investigation, the study of the role of soil-structure interaction (SSI) in the seismic response of isolated bridges was initiated. Elastic models were used to model the insulation system, within which a perfect embedment and a flexible floor system were observed. It is desired that the behavior of the pillar is linear and the foundation system is modeled with bars and recurs that represents the pile and the lateral stiffness of the soil, respectively. The Terminal Portuario bridge of Chancay, which represents systems of high and flexible overpasses of highways with multiple sections, will be desired as a study bridge. Linear spectral analysis was used. The results of these comprehensive numerical analyzes show that the soil-structure interaction causes higher drifts of the isolation system and lower seismic forces on the isolator, (approximately 35% and 25% respectively), and in most cases, lower shears and moments. at the base of the abutments (approximately 20% and 25% in the “X” and “Y” directions, respectively) compared to embedded abutment bridges without SSI.

**Keywords:** Soil-structure interaction, seismic responses, seismic isolation, pilots.

## INTRODUCCIÓN

El alto nivel sísmico en el Cinturón Sísmico del Pacífico es una variante peligrosa que influye en el diseño de las estructuras, ya que pone en peligro los elementos estructurales debido a las altas demandas sísmicas, tales como desplazamientos y esfuerzos internos. Este riesgo latente puede poner en riesgo la vida de los habitantes que utilizan las estructuras junto al funcionamiento. Por tal motivo, existen lineamientos y normativas (E.030, E.031) que permiten asegurar el correcto comportamiento de las estructuras frente a eventos externos. Asimismo, las estructuras de suma importancia (categoría esencial) requieren sistemas de protección sísmica para aislar las superestructuras del movimiento del suelo, según normativas nacionales e internacionales. Estos sistemas de protección sísmica se denominan aisladores o disipadores, lo cuales influyen en la reducción de las respuestas sísmicas y el cambio de las propiedades fundamentales de la estructurales tales como periodo de vibración, frecuencia y otros.

En consecuencia, las respuestas sísmicas de puentes (categoría esencial) deben ser estudiadas tomando en cuenta todas las características reales tales como la geometría, propiedades de los materiales, ubicación de los elementos estructurales y otros para satisfacer la filosofía del diseño estructural. Adicionalmente, el suelo al recibir las cargas verticales y horizontales, generan respuestas del suelo que deben adicionarse al diseño convencional de la estructura. Esto se denomina, interacción suelo-estructura, el cual consiste en la participación del suelo con la estructura para la determinación de respuesta estructural, porque, el suelo al ser un sistema de disipación natural puede ocasionar el aumento o la reducción de las respuestas estructurales.

Es decir, si se requiere un comportamiento más real y la protección frente a eventos sísmicos, se debe considerar un modelamiento conjunto de aisladores con el

efecto de la interacción suelo estructura. En la presente investigación, se procedió a realizar el modelamiento del puente Terminal Portuario de Chancay, donde se observó el uso de aisladores, a su vez, se usó el efecto de la interacción suelo estructura debido a las condiciones de la cimentación, uso de pilotes, y el terreno circundante donde se aplicó para determinar un comportamiento adecuado frente a las demandas existentes.

Para tal efecto, se aplicó el uso de análisis modal espectral que permite la obtención de las respuestas sísmicas de la subestructura, que luego será analizada bajo dos condiciones: un modelo con empotramiento perfecto y otro modelo con interacción suelo estructura. Posteriormente, se realiza la comparativa de los resultados de ambos modelos que permiten el cálculo de las respuestas sísmicas de la subestructura, para observar si se afecta o no.

La presente investigación queda dividida de la siguiente manera:

El capítulo 1 tiene como principal objetivo la presentación de la investigación, mediante el planteamiento. De igual manera, queda dividido en descripción y formulación del problema para explicar el porqué de la investigación. Adicionalmente, se presenta la importancia y justificación del estudio (teórica, metodológica, económica, práctica y social) al mismo nivel que la presentación de los objetivos.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico, dividiéndose en marco histórico donde se observa un breve desarrollo histórico de las variables del estudio. En dicho capítulo, también, se presenta las investigaciones relacionadas con el tema (nacionales e internacionales) que servirán de material referencial para el desarrollo de la investigación. Esta investigación se basa en la estructura teórica y científica que sustenta el estudio, ubicada en el presente capítulo, siguiente luego de las hipótesis y las variables del estudio.

En el capítulo 3, se presenta el marco metodológico, donde se presenta el tipo, método y diseño de la investigación, donde se indica la población y muestra de estudio.

Para el desarrollo de la investigación, se usó técnicas de recolección de datos junto con los instrumentos, presentes en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se presenta los resultados y el análisis de resultados. La primera parte queda dividida en la descripción de los modelos utilizados, de acuerdo a las dimensiones presentadas. En la segunda parte, se presenta los resultados que permiten evaluar los valores dados en el estudio, para emitir un juicio. Finalmente, en el análisis de resultados, se observa la discusión de resultados que evalúan las hipótesis planteadas.

En el capítulo 5, se presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio.



## **1. Planteamiento del estudio**

### **1.1 Descripción del problema**

En el Perú, existe un silencio sísmico desde 1974 por la presencia de un bajo nivel de liberación de energía, esto conlleva a una acumulación de energía que podría ser liberado en cualquier momento. Esto se ha observado en sismo relacionados directamente con el movimiento de la placa de Nazca, los cuales han sido entre 7 a 9 cm de movimiento por año (Gestión, 2021).

Al observarse una gran presencia de ocurrencia de un sismo, el gobierno ha implantado normativas de diseño antisísmico tales como la norma E.030 Diseño-sismorresistente (MVCS, 2019) cuyas principales filosofías son: evitar pérdidas humanas, asegurar la continuidad de los servicios básicos y minimizar los daños a las propiedades. Esta normativa es aplicable exclusivamente para edificaciones, pero en el caso de puentes también puede ser aplicable para la determinación del espectro de respuesta sísmico. De igual manera, se observa la creación del Manual de Puentes (MTC, 2016) que promueve los lineamientos necesarios para desarrollar un correcto diseño sísmico. En tal sentido, se observa que el gobierno está presente y promueve el diseño sismorresistente como eje fundamental por el constante freno sísmico emergente.

No obstante, la creación y puesta en marcha de dispositivos de protección sísmica ayudan a asegurar el correcto seguimiento de las filosofías de diseño planteadas por las normativas peruanos, por ello, en el año 2019, a través del Decreto supremo N° 030-2019-VIVIENDA se aprueba la creación y aprobación de la Norma Técnica E.031 “Aislamiento sísmico”, cuya principal finalidad es mejorar el desempeño sísmico en edificaciones (El Peruano, 2019). Esta normativa es exclusiva para edificaciones que requieran el sistema de protección sísmico. Sin embargo, actualmente, Perú no dispone

de una normativa exclusiva que permita el diseño, control y construcción de aislamientos en estructuras esenciales tales como puentes. En consecuencia, en la presente investigación se plantea la aplicación de la normativa AASHTO 2014 GSDI (2014) que promueve lineamientos y metodologías de diseño para puentes.

Adicionalmente, las estructuras tanto edificaciones como viales (puentes, obras de artes y otros) se apoyan sobre el suelo, este ayuda a transmitir las cargas externas para un mejor funcionamiento. Por ello, el suelo se convierte en un sistema de disipación natural presente en todas las estructuras, que gracias a una correcta caracterización nos ayuda a desarrollar un mejor diseño, convirtiéndose en una interacción entre el suelo y la estructura denominada ISE (interacción suelo-estructura). Una correcta idealización de la ISE ayuda a predecir las respuestas sísmicas de la estructura, especialmente en la subestructura, caso puentes. En otras palabras, en la presente investigación se planteará la comparativa de un diseño convencional que considera un sistema de apoyos fijos frente a un diseño de apoyo con base flexible, considerando la rigidez del suelo para el estudio posterior de las respuestas sísmicas de los aisladores que se propondrán en el presente estudio.

El puente Terminal Portuario de Chancay ubicado en Chancay, Huaral, es un puente de tipo vehicular de dos sentidos el cual sirve como acceso para la Carretera Panamericana, este puente será apoyado sobre pilares. Adicionalmente, frente a un evento sísmico el puente de concreto armado, podría causar daños a las estructuras viales presentes y a las personas que lo transitan por la carretera Panamericana. Por ello, en la presente investigación, se plantea el reforzamiento a través del uso de aisladores sísmicos de tipo goma de alto impacto que asegurarán el funcionamiento frente a un sismo de gran magnitud tal como se viene presentando durante los años.

## **1.2 Formulación del problema**

### ***1.2.1 Problema general***

- ¿En qué medida la interacción suelo-estructura afecta la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?

### ***1.2.2 Problemas específicos***

1. ¿En qué medida el modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?
2. ¿En qué medida el modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?
3. ¿En qué medida el modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?
4. ¿En qué medida el modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?

## **1.3 Importancia y justificación del estudio**

### ***1.3.1 Importancia***

Según las normativas E.030 (2019) y E.031 (2019) tiene como principal finalidad asegurar las vidas de las personas y la vida de las estructuras frente a un evento sísmico para edificaciones. Esta finalidad puede ser aplicable para puentes porque son estructuras esenciales que necesitan mantener el constante flujo de personas y vehículos después de un evento sísmico. Por consiguiente, se busca adicionar un sistema de protección sísmica

que permita la reducción de fuerzas sísmicas y demandas de la subestructura a través de la instalación y puesta en marcha de los aisladores sísmicos que se rige por la normativa AASHTO GDSI (2014). Este sistema de aislamiento permite aislar la superestructura de la subestructura, reduciendo las respuestas estructurales y sísmicas obtenidas en el puente.

Adicionalmente, la consideración de las propiedades del suelo ayuda a desarrollar un comportamiento más asertivo y coherente que permite el desarrollo de las capacidades de los elementos estructurales, principalmente, subestructura. No obstante, este comportamiento conjunto del suelo y estructura (ISE) toma en cuenta las propiedades geométricas y de los materiales del puente, además, la condición de los sistemas de apoyos. Dentro de los sistemas de apoyo, se encuentra los aisladores sísmicos que se realizará en el presente estudio, la interacción suelo-estructura junto con los aisladores sísmicos desarrollan diferentes tipos de respuestas, que, a largo plazo, ayudarán en el continuo funcionamiento frente a eventos sísmicos.

### ***1.3.2 Justificación***

#### **Justificación teórica**

La investigación planteada tiene una justificación teórica porque se utilizará la normativa AASHTO GSID-4 (2014) que contiene los lineamientos y metodologías de diseño para el diseño de dispositivos de aislamiento sísmico para determinar las respuestas sísmicas de la subestructura del puente Terminal Portuario de Chancay. Adicionalmente, la interacción suelo estructura se considerará el uso del modelo Winkler de acuerdo a normativa FEM 356, que indica los parámetros necesarios para el cálculo de rigideces del suelo, considerados como propiedades del suelo. El modelamiento del puente se realizó de manera tridimensional, aplicando el modelamiento numérico de acuerdo al método de elementos finitos para representar el comportamiento frente a cargas externas (sismo).

**Justificación metodológica**

Porque se ha utilizado los lineamientos y metodologías propuesta por la normativa AASHTO GSID-4 (2014) para determinar las respuestas sísmicas en los aisladores de goma de alto impacto. Asimismo, la investigación constituye un antecedente para estudios futuros para la evaluación y reforzamiento de estructuras esenciales, tales como puentes.

**Justificación económica:**

La utilización de dispositivos de aislamientos sísmicos puede ayudar en la reducción de geometría y propiedades de los principales elementos del puente, porque al aplicar dicho sistema se promueve la reducción de demandas frente a fuerzas externas. En tal sentido, la reducción de demandas promueve la seguridad de la estructura junto a la optimización de elementos estructurales, tales como elementos de la subestructura (cimentación) y superestructura (tablero). No obstante, la aplicación de la interacción suelo estructura puede ayudar a la optimización de elementos estructurales, también, porque permite que el suelo trabaje como un sistema de disipación de energía reduciendo efectos colaterales.

**Justificación práctica**

La presente investigación promueve la divulgación de información científica y aplicada para la aplicación de sistemas de protección sísmica (aisladores) y efectos de interacción suelo estructura. En esta investigación se tomará como población los puentes rectos con sección cajón de concreto armado, constituyendo un antecedente para el desarrollo de puentes de concreto armado similares. Asu vez, se presenta el desarrollo de las propiedades del suelo para la representación de rigideces del suelo, que servirán para investigaciones de tipo estructural y/o geotécnicas. Finalmente, se desarrolló un

lineamiento que combina la interacción suelo estructura junto a sistemas de protección sísmica para asegurar el continuo funcionamiento frente a eventos sísmicos.

### **Justificación social**

Los puentes al ser estructuras de tipo esencial deben continuar funcionando frente a eventos extremos, entre ellos sismos. Por tanto, el desarrollo de estructuras que puedan funcionar y asegurar las vidas humanas que la utilizan es de vital importancia para gobiernos locales. Adicionalmente, el uso de sistema de dispositivos sísmicos ayuda a asegurar el funcionamiento de los elementos estructurales frente a sismos, convirtiéndose en un sistema de protección que ayuda la reparación y mantenimiento de los diferentes tipos de puentes.

#### **1.4 Delimitación del estudio**

- **Delimitación espacial:** El estudio tiene objetivo principal el desarrollo y cálculo de las respuestas sísmicas en aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay.
- **Delimitación temporal:** Los datos utilizados en la presente investigación son referentes a un estudio previo realizado en 2013, las cuales contienen planos, levantamientos existentes, ensayos no destructivos y otros, similar manera se ha considerado los datos referentes a un geotécnico que permite la caracterización del suelo para las propiedades constitutivas, principalmente, rigidices del suelo.
- **Delimitación teórica:** En la presente investigación se desarrollará el diseño según las metodologías AASHTO (2010) aplicable a un aislador sísmico, considerando la interacción suelo-estructura de la normativa FEMA 356 (1996) para la obtención de las respuestas sísmicas.

## **1.5 Objetivos de la investigación**

### **1.5.1 General**

- Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.

### **1.5.2 Específicos**

1. Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
2. Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
3. Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
4. Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Marco histórico

La interacción entre la estructura y el suelo en que se desplanta se da tanto ante cargas gravitacionales continuas, como ante cargas dinámicas. Es por ello que algunos autores son ahora más precisos y se refieren como interacción dinámica suelo-estructura a aquélla que ocurre durante la acción de sismos, principalmente.

Así, 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 flexibilidad de este ante solicitudes dinámicas. La interacción modifica las propiedades dinámicas de la estructura, así como las características del movimiento del terreno en la vecindad de la cimentación (Avilés 1999). Los efectos de la interacción entre el suelo y la estructura pueden descomponerse en inerciales y cinemáticos, como se ha propuesto desde hace tiempo (por ejemplo, Whitman y Bielak 1982, Avilés 1999). El alargamiento del periodo fundamental, el incremento o la reducción del amortiguamiento y la modificación de la ductilidad del conjunto suelo-cimiento-estructura, con respecto a los valores que tendrían en su condición en base rígida, son producto de la interacción inercial. Los resultados de la interacción cinemática son a reducción de los componentes de traslación de la cimentación por el efecto promedio de ésta, el cabeceo y la torsión de la cimentación inducidos también por su efecto promedio, así como el filtrado de los componentes de alta de la excitación sísmica (Avilés, 1999).

Es una percepción fuerte del autor que la importancia de tomar en cuenta la interacción dinámica suelo-estructura en el análisis y diseño sísmico de estructuras es soslayada a nivel mundial. Si esta práctica no es del todo buena en suelos relativamente firmes, pero deformables, es realmente inaceptable cuando



se diseña y construye en suelos muy blandos, como los de Ciudad de México. Con base en la experiencia del autor principalmente, a continuación, se ilustra que la interacción suelo-estructura puede ser muy importante en suelos firmes de relleno y cimentaciones someras, para después discutir su indudable importancia en suelos blandos con base en estudios realizados por varios autores.

Según Makris (2018) el aislamiento consiste en desacoplar la estructura de la cimentación respecto al movimiento del suelo, este concepto ha sido desarrollado durante toda la civilización. Así, en 1870, Jules Touaillon de la ciudad de San Francisco patentó un instrumento que permitía asegurar la estructura contra eventos sísmicos. El sistema consistió en un sistema de esferas colocados en superficies cóncavas que se movían de acuerdo a las fuerzas sísmicas, resistiendo las cargas de gravedad y cargas horizontales dadas. Este sistema sería el precedente de lo que se conoce actualmente como sistema de aislamiento por deslizamiento. En 1908, en la zona de Reggio Messina, Italia, el sismo ocurrido en dicha región, mata alrededor de 160 000 personas, lo que conlleva a la discusión de un sistema de protección, concluyendo que la mejor manera es separar la estructura del suelo. Al año siguiente, en 1909, J. A Calateriens, patenta un sistema de protección para el diseño sísmico.

La primera implementación del sistema de aislamiento sísmico, fue realizado por Frank Lloyd Wrigth para el diseño del Hotel Imperial en Tokio, Japón. En este proyecto se introduce lo que es el concepto de la disipación de energía, permitiendo el avance de la filosofía el aislamiento sísmico.

Desde 1920, el desarrollo del aislamiento sísmico viene ser dado para la protección de estructuras frente a terremotos, las cuales pueden ser edificaciones de concreto, acero, albañilería y madera, junto a las obras civiles tales como puentes.

El primer caso de aplicación de sistema de aislamiento sísmico fue realizado en una escuela primaria en Skopje, República del Norte de Macedonia en el año 1969, el edificio de tres pisos fue resistido por aisladores de tipo de goma. Siguiendo lo aprendido anteriormente, el empleo de los aisladores fue realizado en diferentes países tales como Rusia, Francia, Estados Unidos, Japón, China y otros.

## **2.2 Investigaciones relacionadas con el tema**

### **2.2.1 Investigaciones nacionales**

Antonio M. (2020) este estudio se enfoca en estructuras de los estados costeros hacia el Océano Pacífico vulnerables sísmicamente, por lo que se ven obligados a diseñarse considerando acciones sísmicas. Una de ellas son los puentes vehiculares que por lo general son estructuras esbeltas, resultando necesario desarrollar análisis completos de todos sus elementos; uno de ellos es la cimentación que es su medio de soporte. Debido a las propiedades mecánicas del medio de soporte, en el caso de los puentes, generalmente se requiere una cimentación profunda, lo cual es aún más necesario si los estratos del suelo sobre la cual se desplanta tienen poca rigidez y resistencia (suelo blando), por lo que se requiere de análisis de interacción suelo estructura para conocer las demandas a las que pudiesen estar sometidas las pilas de cimentación a lo largo de su longitud. Para evaluar estas demandas existen diferentes tipos de análisis que conducen a resultados exactos o aproximados, los primeros pueden demandar grandes esfuerzos computacionales y mucho tiempo. Haciendo un análisis en el dominio de frecuencia, se realizó un análisis paramétrico donde se describen todos los parámetros que influyen en la respuesta de la demanda sísmica y se definen los intervalos de aplicabilidad esperados para cada parámetro, obteniendo para el caso de estudio un análisis completo. De acuerdo con esto, el objetivo de la presente investigación fue determinar las demandas sísmicas que se esperan en puentes localizados en la Costa del Pacífico considerando los

efectos interacción suelo estructura, para ello se realizan análisis paramétricos en el dominio de la frecuencia que permiten estimar las demandas de momento flexionante entre dos estratos de suelo y en la cabeza del pilote de cimentación, con base en los resultados obtenidos se conducen análisis de regresión no lineal múltiple para proponer ecuaciones para estimar estas demandas.

Marín (2019) en tesis de maestría “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” se enfocó en 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 fundamentó 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, condujo 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 inelástico. Al combinarlo con el modelo analítico de interacción suelo-estructura de Barkan-Savinov mediante el método de solución 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, permitiendo establecer criterios de optimización de diseño a nivel de resistencia, rigidez o fatiga.

Moscoso (2019) en su tesis “Evaluación del desempeño de edificaciones hospitalarias prefabricadas con aislamiento sísmico en el Perú”, El objetivo principal fue desarrollar un estudio de los elementos prefabricados, tales como losas, columnas y vigas, considerando el uso de aisladores sísmicos en un hospital. La tesis es de tipo cuantitativo, descriptivo y correlacional. La muestra es la estructura de un hospital con elementos prefabricados tanto columnas como vigas. El resultado más importante fue la obtención de la respuesta máxima para una aceleración pico de 0.525g, estimando un valor de 4.2/1000, ocasionando la edificación entre a daño elevado para posteriormente ocasionar fisuras menores 0.10mm. Mientras en un sismo con aceleración máxima de 0.675g, se observa que la estructura en un rango de ocupación inmediata, generándose una protección a los elementos estructurales prefabricados.

Este estudio es importante porque permite verificar la deriva máxima de una estructura de esencial con aisladores, similar al puente Terminal Portuario de Chancay, en otras palabras, las deformaciones laterales debido al sismo, disminuyen para la protección de los elementos estructurales.

Bustamante (2019) en su tesis de maestría “Propuesta de aisladores sísmicos para la disipación de energía en el desempeño estructural por desplazamiento en edificaciones-Unach-Chota”. El objetivo principal de la investigación fue determinar el desplazamiento relativo de la estructura mediante la consideración de la interacción suelo-estructura y el uso de los aisladores sísmicos con núcleos de plomo HDR, aplicando la normativa ASCE 7-10, FEMA1 ATC-40 y otros. El enfoque de la investigación fue de tipo cuantitativo,

descriptivo, no experimental y correlacional. La muestra fue la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, dicha estructura fue modelada y analizada mediante un análisis no lineal basado por desplazamiento propuesto por Priestley. El resultado más importante fue la demostración de la reducción de los desplazamientos horizontales por piso, implicando un aumento de la disipación de energía. Adicionalmente, se muestra un aumento del periodo fundamental de la subestructura, disminuyendo las aceleraciones de la estructura, para posteriormente calcular las respuestas estructurales mediante el análisis por desempeño.

Este trabajo sirve material de contrastación de resultados considerando el apoyo de los aisladores en la estructura, por tanto, se considerarán como valores de comparación frente a las dimensiones planteadas en este estudio.

Pajares (2016) en su tesis de maestría “Comparación de la respuesta sísmica de puentes viga-losa, con y sin aisladores sísmicos, en Cajamarca”. El objetivo de la investigación fue comparar la respuesta sísmica de un puente viga-losa considerando un diseño sin aisladores con un diseño con aisladores a través de programas computacionales. El enfoque es cuantitativo, descriptivo y diseño correlacional. La muestra fue un puente de Cajamarca de tipo viga losa, el cual se consideró con apoyos y sin apoyos de aisladores; ambos modelos fueron modelados en un programa computacional (SAP2000 v14.2.1), donde se solucionaron a través del método de los elementos finitos. El resultado más resaltante de la investigación que la reducción de la subestructura es prioritaria, mientras el aumento de los desplazamientos de la superestructura es consecuencia de la consideración de los apoyos de aisladores y la disipación de energía presente.

Este estudio es importante para la presente investigación porque servirá como medio de comprobación de resultados frente a resultados obtenidos, tales como desplazamientos laterales, aplicando el sistema de aislación sísmica.

### ***2.2.2 Investigaciones internacionales***

Martínez (2017) esta tesis se enmarca dentro del estudio del comportamiento dinámico de puentes de ferrocarril derivado del paso sobre ellos de trenes a grandes velocidades. Tiene una clara vocación práctica ya que, partiendo de la investigación de la influencia de la interacción suelo-estructura en el fenómeno vibratorio involucrado, propone las pautas a seguir en la confección de modelos que permitan caracterizar la respuesta de puentes reales para su diseño o actualización. En el desarrollo de la misma se determina, mediante los correspondientes estudios paramétricos, la influencia de las principales variables implicadas en el comportamiento dinámico del puente: la modelización estructural, tipo de análisis, tamaño de la zona de terreno a modelizar, tamaño de los elementos, etc. A partir de modelos confeccionados siguiendo dichas pautas se pone de relieve la importancia que adquiere en el análisis la interacción suelo-estructura. Se realiza una verificación de la metodología en base a un ensayo experimental a fin de validar la precisión del método. Con dicha metodología se realiza un estudio pormenorizado del comportamiento de viaductos de luces pequeñas que son especialmente sensibles a los fenómenos resonantes.

Tongakar (2003) en el trabajo de investigación “Seismic response of isolated bridges with soil–structure interaction”. El objetivo principal de la investigación fue determinar el efecto de la interacción suelo-estructura con aisladores sísmicos, porque ambos sistemas brindan flexibilidad al puente, por tal motivo se realizó un estudio numérico considerando la interacción suelo-estructura. El tipo de investigación es cuantitativo, descriptivo y correlacional. La muestra fue dos modelos matemáticos de

puentes, que consideran la interacción suelo-estructura y la no interacción suelo-estructura, en diferentes tipos de suelos, desde un suelo blando hasta suelo rígido. El resultado principal fue que la interacción suelo-estructura en el análisis estructural resultó en la mejora de la seguridad y reducción de los costos de diseño, la ISE afecta los desplazamientos del estribo, mientras en el sistema de aislamiento no tiene mucha afectación.

Esta tesis servirá como apoyo metodológico en la presente investigación porque permite estudiar los pasos necesarios para el estudio de diseño con aisladores.

Dicleli et al. (2005) estudió el efecto de la interacción suelo-estructura sobre el comportamiento sísmico de puentes aislados sísmicamente. Para ello, se seleccionan dos puentes típicos aislados sísmicamente. Los puentes seleccionados tienen características distintas para representar aquellos puentes con: (1) superestructura pesada y subestructura ligera y (2) superestructura ligera y subestructura pesada. Primero se construyen modelos estructurales detallados de ambos puentes que excluyen e incluyen los efectos de interacción suelo-estructura. A continuación, se realizan análisis iterativos del espectro de respuesta multimodo de los puentes teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de los cojinetes de aislamiento. Los resultados del análisis han revelado que los efectos de la interacción suelo-estructura pueden pasarse por alto en el análisis sísmico de puentes aislados sísmicamente con superestructura pesada y subestructura ligera construidas sobre suelo rígido. Sin embargo, los efectos de interacción suelo-estructura deben considerarse para puentes con superestructuras ligeras y subestructuras pesadas independientemente de la rigidez del suelo de cimentación. En condiciones de suelo blando, los efectos de la interacción de la estructura del suelo deben considerarse independientemente del tipo de puente.

Ucak et al. (2008) estudio el papel de la interacción suelo-estructura (SSI) en la respuesta de puentes sísmicamente aislados. Se utiliza un modelo hysterético bilineal genérico para modelar el sistema de aislamiento. Se asume que el comportamiento del pilar es lineal y el sistema de cimentación se modela con resortes y dashpots dependientes de la frecuencia. Se consideraron dos sistemas de puentes, uno representativo de los sistemas de pasos elevados de carreteras cortos y rígidos y otro representativo de puentes de carreteras altos y flexibles de varios tramos. Se emplearon análisis de historia de tiempo no lineal con dos conjuntos de movimientos sísmicos; uno que contiene 20 acelerogramas de campo lejano y otro con 20 acelerogramas de falta cercana. Los resultados de estos análisis numéricos integrales muestran que la interacción suelo-estructura provoca mayores derivas del sistema de aislamiento y, en muchos casos, mayores cizalladuras de pilares en comparación con los puentes de pilares fijos (sin SSI).

Silva et al. (2008) este artículo presenta un análisis de la respuesta inelástica de las columnas de puentes soportadas sobre grupos de pilotes que consisten en pilotes de cáscara de acero fundidos en el lugar (CISS) de conexión de momento completo. Un componente original del trabajo presentado en este trabajo es que los modelos analíticos consideraron las acciones no lineales que se desarrollan en la columna, pilotes de apoyo y suelo. El análisis confirmó que las variaciones en la rigidez horizontal y vertical del suelo afectan la deflexión lateral y la rotación de la tapa del pilote, respectivamente. Los resultados de este análisis también indican que, para las columnas con relaciones de aspecto menores a seis, la contribución de la interacción suelo-estructura es significativa; sin embargo, para columnas con relaciones de aspecto más altas y para suelos más rígidos, los efectos de la interacción suelo-estructura son insignificantes.



## **2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio**

### **2.3.1 Marco Normativo**

En la presente investigación, se presenta normativas referentes al análisis sísmico de puentes con el diseño de aisladores sísmicos. Por tanto, se procedió aplicar las normativas Guide specifications for seismic isolation design de AASHTO (2010) y la normativa Guide specifications for LRFD seismic bridge design de AASHTO (2011).

### **2.3.2 Interacción suelo estructura**

#### **2.3.2.1 Definición**

La interacción suelo estructura tiene como principal fin, permitir la participación del suelo dentro del análisis estructural. Esto se puede realizar gracias a la consideración de que el suelo se comporta similar a un resorte vertical en un modelo simple, o la consideración de más resortes para modelar un comportamiento completo. (López, 2012)

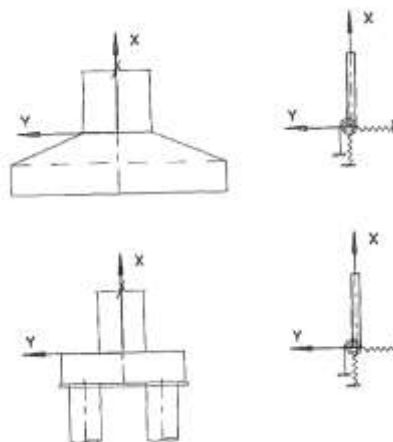
#### **2.3.2.2 Cimentación**

Según Manterola (2006) son todos los elementos que transmiten las cargas de la superestructura hacia el terreno. Este tipo de elemento puede dividirse según la profundidad de cimentación:

- **Cimentaciones superficiales:** Son aquellas cimentaciones que se encuentran a nivel superficial, es decir, no requieren excavaciones profundas. Así, por ejemplo, zapatas y pozos de cimentación.
- **Cimentaciones Profundas:** Este tipo de cimentaciones se relacionan a grandes excavaciones verticales hasta alcanzar un estrato adecuado, entre ellas tenemos, los pilotes.

**Figura 1:**

*Tipos de cimentación en puentes (superficial y profunda)*



*Nota:* Tomado de *Puente: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción* por Manterola, 2006 de COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. (p 625)

En la figura se presenta los dos tipos de cimentación, superficial y profunda, junto con la representación matemática para el modelamiento de la rigidez del suelo presente en diferentes tipos de estructuras.

### 2.3.2.1 Pilotes

Son elementos estructurales de diferentes materiales tales como concreto armado, acero estructural y madera, estos elementos se utilizan cuando existen cimentaciones profundas por cuestiones de seguridad. (Das, 2013)

#### 2.3.2.1.1 Características

- Existencia de capa de suelo con propiedades no adecuadas para cimentar, es decir, se busca que el pilote pueda transmitir las cargas de la estructura a un estrato más fuerte.
- Resistencia de la carga horizontal junto a la resistencia de la carga vertical, en otras palabras, si se observa presencia de cargas horizontales (sismo y viento), el pilote puede flexionarse y resistirlas.
- Colocación lejos de la zona activa en suelos de tipo expansivos y colapsable para llegar hasta zonas estables donde puedan trabajar de manera correcta.

- Los pilotes son usados para construir cimientos de algunas estructuras como torres de transmisión, plataformas y losa de sótano.

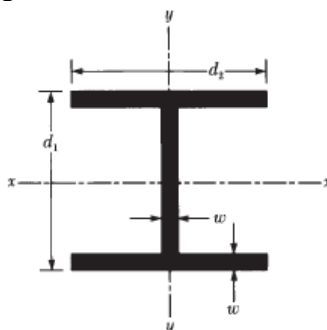
### 2.3.2.1.2 Tipos

Según Das (2013), los pilotes se dividen en:

- **Pilotes de acero:** Este tipo de pilotes tiene como sección una viga tipo H de acero estructural. Normalmente es aplicado para penetrar capas duras de suelo, tienen una alta capacidad, soporta grandes esfuerzos de construcción.

#### Figura 2:

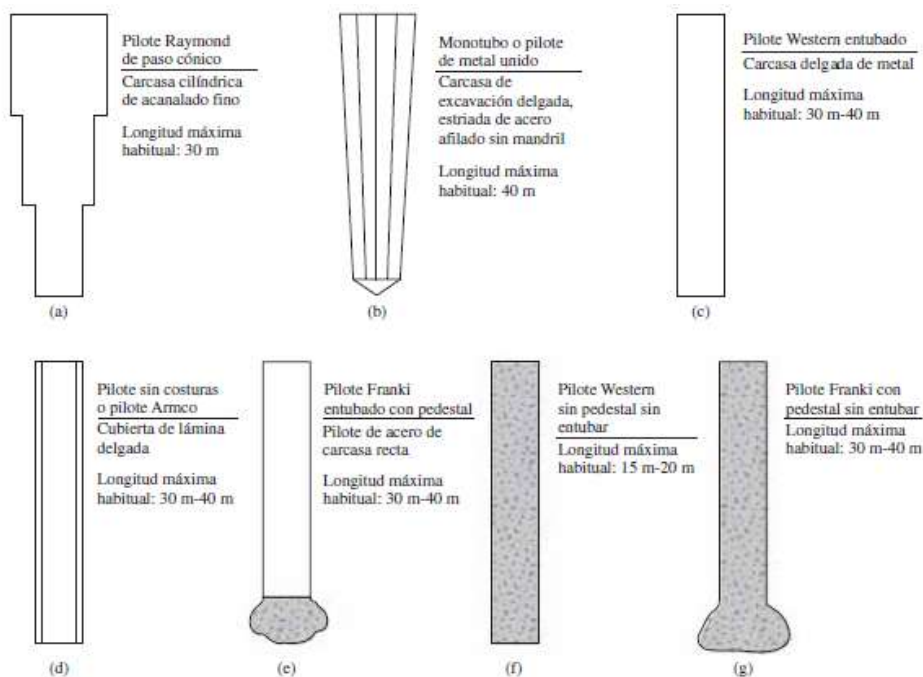
*Pilotes de acero de sección H*



*Nota:* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 536), por Das, 2013, Cengage Learning.

- **Pilotes de concreto:** Son pilotes de concreto armado que pueden ser prefabricados o fabricados in-situ. El proceso de construcción es similar en ambos casos, primero se perfora, luego se llena con concreto fabricado o prefabricado.

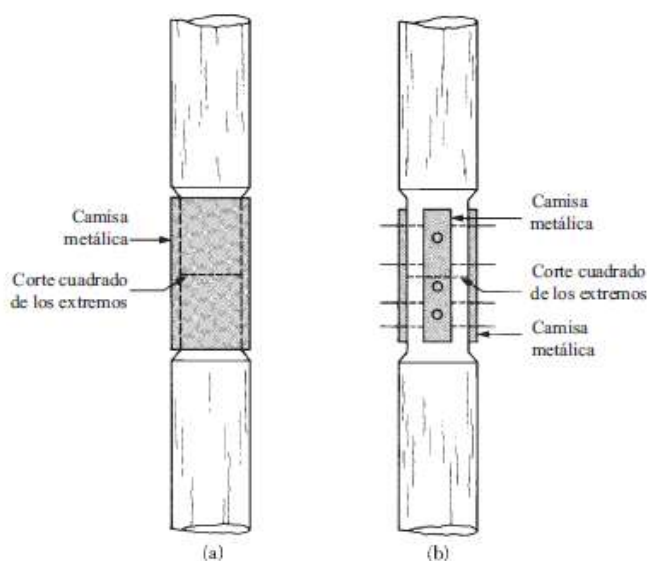
**Figura 3:**  
*Pilotes de concreto*



*Nota:* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 540), por Das, 2013, Cengage Learning.

- **Pilotes de madera:** Este tipo de pilote es un tronco de árbol del cual se ha quitado sus ramas y cortezas, no soporta altos esfuerzos durante la construcción y normalmente se rigen bajo manuales dependiendo del tipo de uso.

**Figura 4:**  
*Pilotes de madera*



*Nota:* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 542), por Das, 2013, Cengage Learning.

### 2.3.2.1.3 *Proceso constructivo*

Según Das (2013) una buena mayoría de pilotes son clavados en el sitio por equipos martillos. Pero en casos que se requieran, estos pueden ser barrenados o por inyección. Las máquinas para clavar los pilotes incluyen martillo de gravedad, martillo de vapor o martillo diesel.

Para asegurar el clavado del pilote, se coloca una especie de tapa (amortiguador), cuya principal función es reducir la fuerza de vertical, sin embargo, la aplicación depende del diseño.

De acuerdo a la colocación del pilote, se divide en:

- Pilotes de desplazamiento: referidos a los pilotes que son clavados porque tienden a mover los estratos adyacentes del terreno, para densificar el suelo. En este grupo tenemos los pilotes de concreto y los pilotes de tubos cerrados.
- Pilotes sin desplazamiento: Caso contrario, a los pilotes de desplazamiento, estos tienden a tener poco desplazamiento entre estratos. Entre ellos tenemos los pilotes H.

#### **Figura 5:**

*Proceso constructivo-Hincado de pilotes*



*Nota:* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 544), por Das, 2013, Cengage Learning.

### 2.3.2.1.4 Estimación de longitud de un pilote

La selección de un pilote depende de dos tipos mecanismos de transferencia de carga, entre ellos tenemos: pilotes en punta y pilotes en fricción.

#### Pilotes en punta

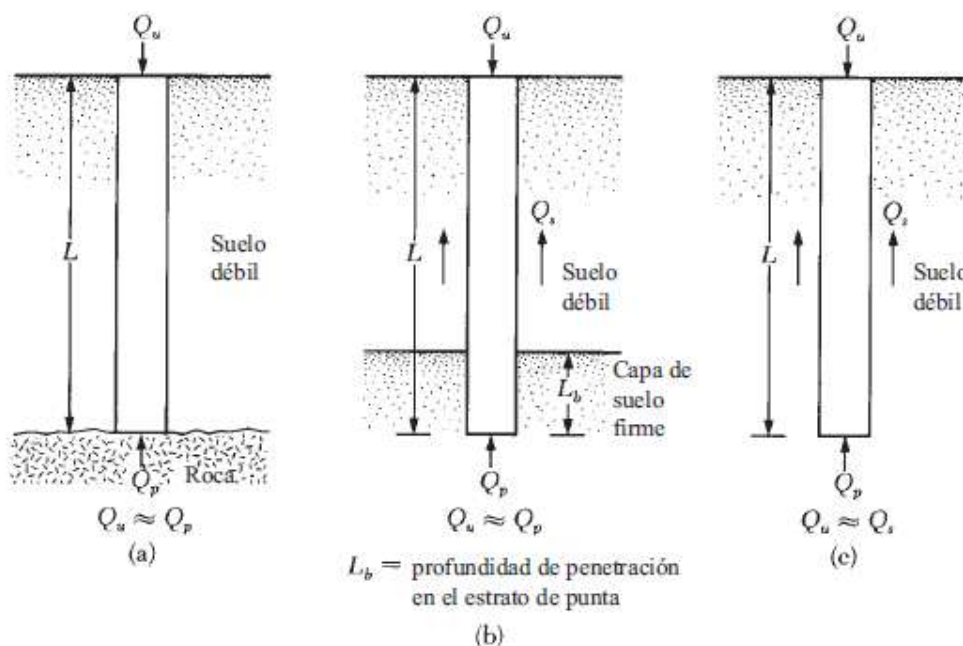
Este tipo de pilote depende estrictamente de la presencia de la roca madre o de material firme para cimentar, en este sentido, la capacidad de soporte depende del material adyacente. Es decir, dependiendo de la longitud de estrato a cimentar los pilotes se colocarán, en casos de que el suelo no tengo buenas características, se podrá empotrar al suelo firme algunos metros.

#### Pilotes en fricción

Este tipo de pilote porque la resistencia que adquiere es dependiente de la fricción ocurrida en la superficie. La longitud del pilote depende de la resistencia al corte del suelo, las demandas y geometría del pilote.

#### Figura 6:

##### *Pilote en fricción*



Nota: Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 543), por Das, 2013, Cengage Learning.

### **2.3.2.2 Modelos estáticos de ISE**

Según Manterola (2006), el procedimiento de modelado del suelo requiere diversos tipos de caracterización para determinar los parámetros de diseño. Estos valores se obtienen a través de ensayos de laboratorio y de campo.

El modelamiento del suelo permite la caracterización del suelo para ser estudiado frente a demandas locales y globales.

De acuerdo a Manterola (2006), dentro de los modelos del suelo se encuentran los siguientes:

#### **2.3.2.2.1 Modelo elástico-lineal:**

Se considera al suelo como un sólido de tipo lineal-elástico; en otras palabras, el suelo se comporta de acuerdo a las cargas aplicadas, aplicando el método de superposición de cargas. No obstante, no se representa las irregularidades en los estratos del suelo y el comportamiento real del suelo.

#### **2.3.2.2.2 Sólido plástico:**

En este modelo se considera la plastificación del suelo, cabe decir, que aparece la resistencia a estados últimos por la presencia de la superficie de rotura.

#### **2.3.2.2.3 Modelo Winkler:**

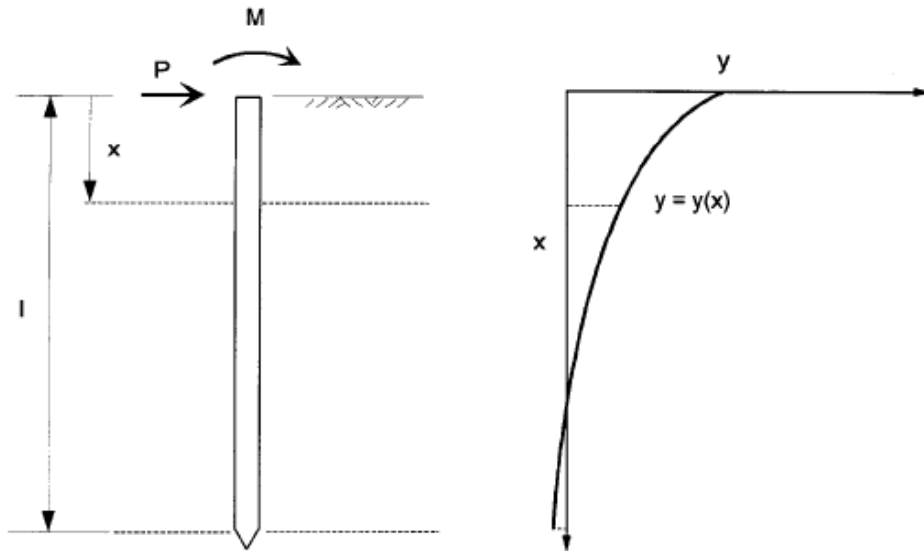
Este modelo es denominado bajo el nombre del método de balastos. Se considera que el suelo se deforma en proporción a la carga aplicada, apareciendo un valor denominado “k”.

#### **2.3.2.2.4 Método p-y**

Este método se ha aplicado de manera empírica, considerando cargas laterales como aplicación para caracterizar el suelo por unidad de longitud. La condición de este método parte de que el suelo se comporta no linealmente, en consecuencia, el pilote se comporta con la misma curva. La construcción de la curva depende estrictamente de las

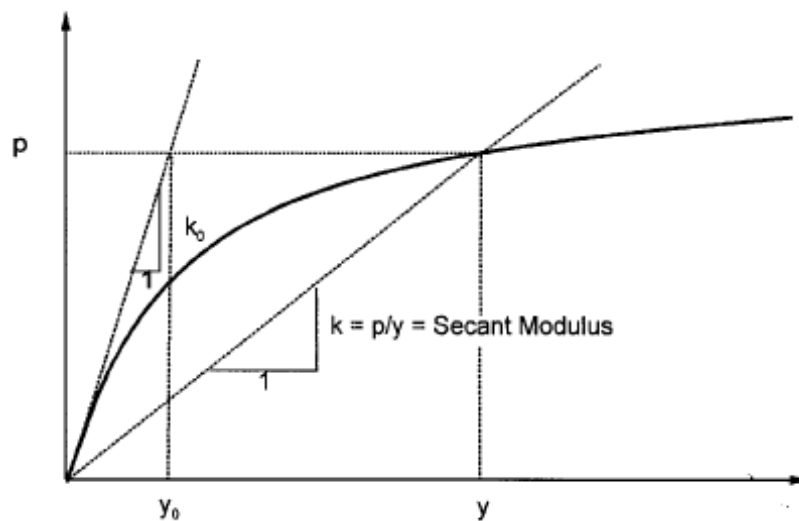
propiedades de los suelos, tales como ángulo de fricción, cohesión y otros. Las curvas  $p$ - $y$  son desarrolladas de acuerdo al tipo de suelo y profundidad del pilote, que han sido validadas en campo.

**Figura 7:**  
*Deflexión de curva de pilote*



*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 230), por Chen et al, 2003, CRC Press.

**Figura 8:**  
*Resistencia lateral de suelo de acuerdo a curva “p-y” en profundidad x.*



*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 230), por Chen et al, 2003, CRC Press.

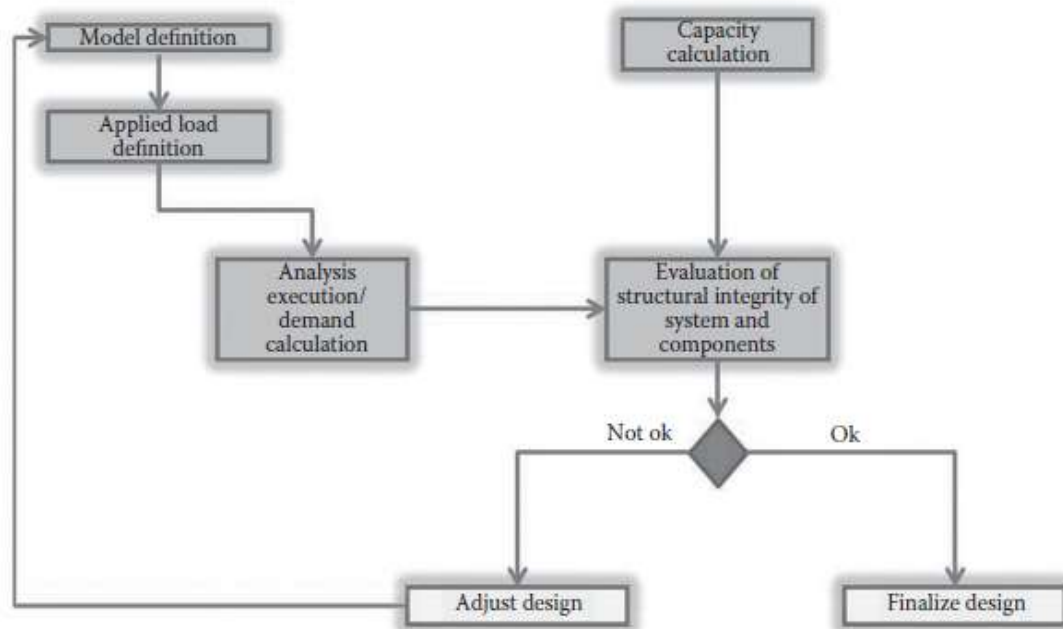


### 2.3.3 Modelamiento numérico de la estructura

El modelamiento de la estructura durante la fase analítica, se realiza mediante el análisis de elementos finitos y programas que evalúan integralmente al puente. De acuerdo a las metodologías actuales, el uso del método de los elementos finitos (MEF) para la resolución de problemas analíticos. Similar caso, el proyectista debe tener en cuenta las diferentes teorías, suposiciones y bibliografía para la solución analítica estructural.

#### Figura 9:

Diagrama de flujo del modelamiento numérico a ejecutar en un diseño



Nota: Tomado de *Bridge Engineering Handbook: Fundamental* (p. 230), por Chen et al, 2014, CRC Press.

De acuerdo a la figura anterior, se muestra el proceso de definición del modelo estructural de acuerdo al proyecto a desarrollar, siguiendo con la aplicación de las demandas de la estructura, en este caso se puede aplicar las cargas verticales y las cargas horizontales. Posteriormente, se procede a realizar el análisis estructural mediante lineamientos actuales de normativas o códigos de diseño; luego, se procede a realizar la evaluación estructural integral de acuerdo al modelamiento inicial, si procede se finalizar el diseño, ya que se cumple todas verificaciones y requisitos para tener una estructura

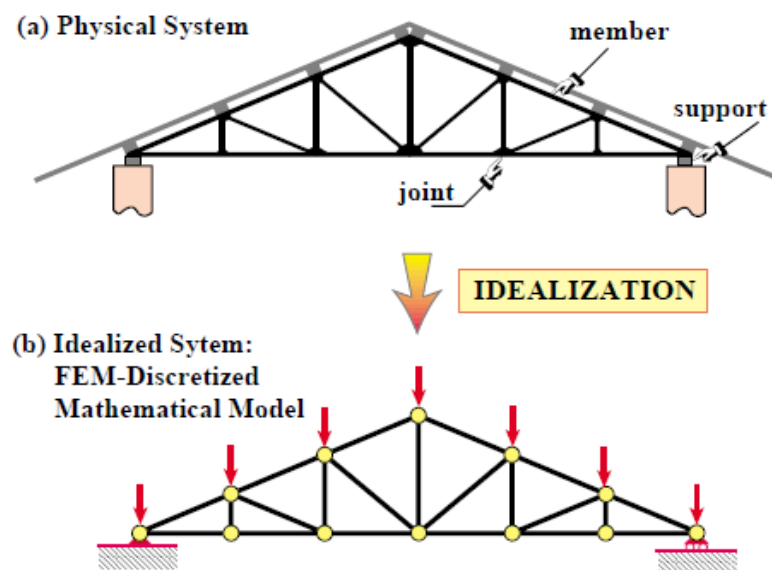
segura. No obstante, si no se cumple la evaluación se procede a recapitular todo el proceso planteado para continuar nuevamente el proceso.

### 2.3.3.1 Método de elementos finitos

La estructura se puede representar mediante un modelo matemático equivalente, donde se toma en cuenta las propiedades, geometría y posición de los principales elementos estructurales. En tal sentido, el método de elementos finitos permite la idealización de los elementos estructurales, ver siguiente figura.

**Figura 10:**

*Representación idealizada de un sistema en elementos finitos.*



*Nota:* Imagen que muestra la representación gráfica de los elementos finitos en 1D, 2D y 3D. Tomado de *Introduction to Finite Element Methods* (p. 6-9) por Felippa, 2004, University of Colorado.



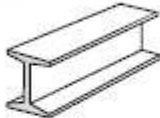

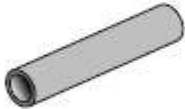




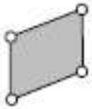
Se observa el modelo físico real en (a), mientras el modelo discretizado en elementos finitos (b), representa la geometría de los elementos estructurales, junto con las demandas y las condiciones de apoyo de la estructura.

### 2.3.3.1 Elementos estructurales.

La representación idealizada de los elementos estructurales viene dada por la creación elementos finitos, considerando los grados de libertad, propiedades y geometría dados. En consecuencia, los elementos tipo barra tales como barras, vigas, tubos y otros puede representarse de acuerdo a sus grados de libertad restringidos en sus nodos, y las fuerzas internas, tales como axiales, momentos en ambos sentidos. Mientras, en el caso de los elementos de placas de concreto, losas de concretos o planares, se representan mediante elementos paneles que permiten controlar las deformaciones por corte, axial y rotacional.

**Figura 11:**

*Representación gráfica de los elementos finitos 1D, 2D y 3D*

Physical Structural Component	Mathematical Model Name	Finite Element Idealization
	bar	
	beam	
	tube, pipe	
	spar (web)	
	shear panel (2D version of above)	

*Nota:* Imagen que muestra la representación gráfica de los elementos finitos en 1D, 2D y 3D. Tomado de *Introduction to Finite Element Methods* (p. 6-9) por Felippa, 2004, University of Colorado.

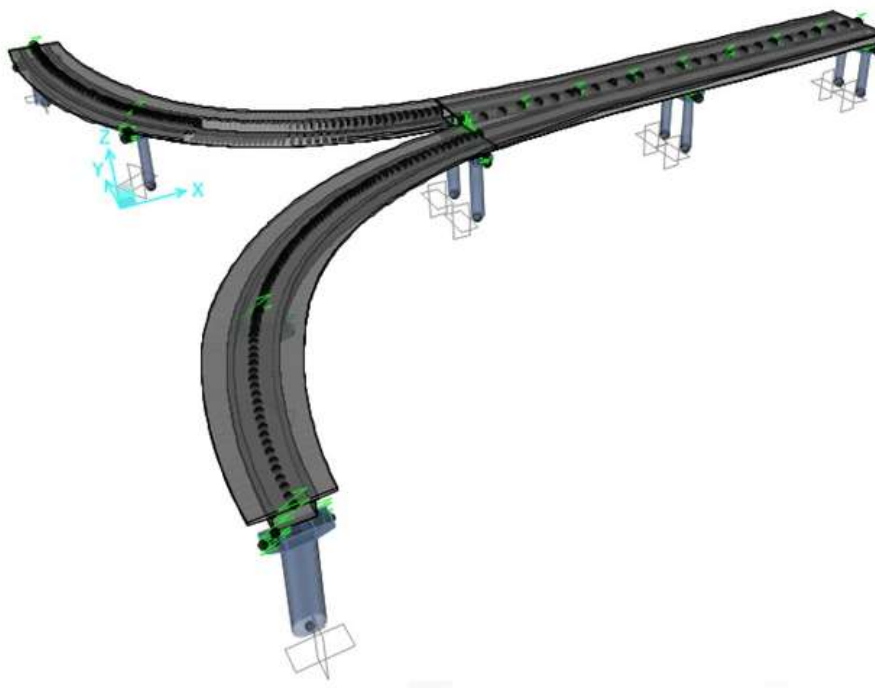
### 2.3.3.2 Modelamiento de la estructura

El modelamiento de la estructura consistió en la utilización de modelos barra, apoyos y resortes que simulen el comportamiento de los apoyos de neopreno. Además, se

utilizó las propiedades geométricas y de los materiales planteadas por los planos indicados en el estudio de creación del Terminal Portuario de Chancay.

**Figura 12:**

*Modelación de la estructura de puente Terminal Portuario de Chancay*

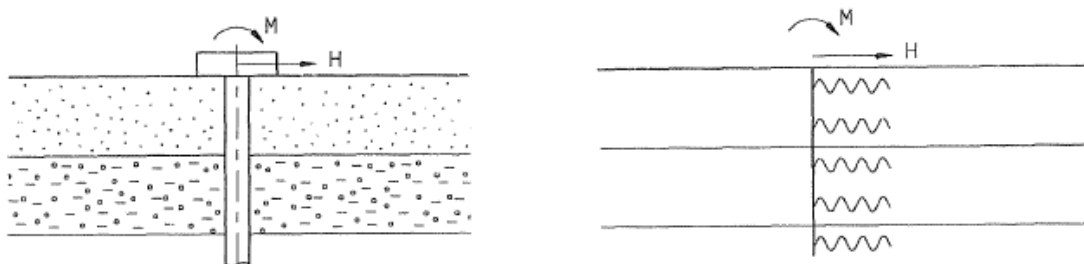


*Nota:* Modelo desarrollado en el programa Csi Bridge v22.

### **2.3.3.3 Modelamiento de los pilotes**

El modelamiento de los pilotes se ha realizado bajo la formulación de las barras, donde se produce la caracterización del suelo en función a los estratos que perfora el pilote. Este modelo en barra permite un comportamiento similar al real porque reproduce las características mecánicas del pilote. El suelo por cada estrato perforado se modela de acuerdo al modelo de Winkler, asignando los muelles correspondientes a cada nudo de la barra, multiplicando por la longitud equivalente del nudo y el ancho del pilote. (Manterola, 2006).

**Figura 13:**  
Modelación tipo de barra según estratos perforados.



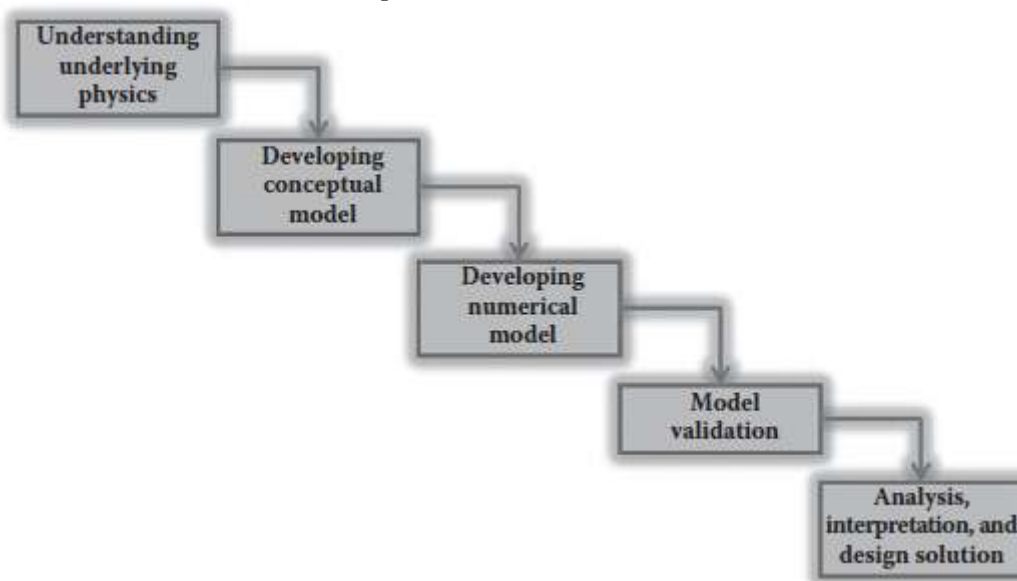
*Nota:* Tomado de Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción por Manterola, 2006 de COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. (p. 636)

### 2.3.4 Análisis estructural

#### 2.3.4.1 Definición

Consiste en la metodología de análisis para el tratamiento de datos en elementos estructurales para determinar las respuestas estructurales frente a las demandas de diseño.

**Figura 14:**  
Proceso de análisis estructural para una estructura



*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering Handbook: Fundamental* (p. 230), por Chen et al, 2014, CRC Press.

El proceso de análisis se desarrolla desde el entendimiento de las leyes de la física, aplicando principios físicos que permitan el correcto funcionamiento de la estructura; siguiendo con este proceso, se pasa al desarrollo del modelo conceptual, en donde se entiende los objetivos del diseño mediante el desarrollo de modelamiento numérico; si se completa las fases anteriores, se calibra el modelo a través de resultados de campo o

experiencia del proyectista. Finalmente, se analiza e interpreta los resultados que permitirán diseñar la estructura frente a las demandas externas e internas. Esto se puede observar en la figura anterior.

### **2.3.4.2 Análisis modal espectral**

Es una herramienta de análisis que determina la máxima respuesta en un espectro de un suelo dado en un diseño. Los modelos de análisis espectrales son de tipo lineal elástico basados en rigideces efectivas y basados en un amortiguamiento. (Priestley et. al. 1996).

$$M^{(e)} \ddot{q} + C^{(e)} \dot{q} + K^{(e)} q = -M^{(e)} r^{(e)} \ddot{u}_g$$

Según la fórmula anterior, donde  $\ddot{q}$  es el vector de aceleraciones,  $\dot{q}$  es el vector de velocidades,  $q$  es el vector de desplazamiento,  $m$  es la matriz de masas,  $c$  es la matriz de amortiguamiento, y  $k$  es la matriz de rigidez.

### **2.3.5 Respuestas sísmicas de la subestructura**

#### **2.3.5.1 Respuestas estructurales**

##### **2.3.5.1.1 Definición**

Son los valores obtenidos debido a las fuerzas externa en la estructura, en otras palabras, se observa la formación de fuerzas internas tales como deformaciones laterales, giros, momentos flectores y fuerzas cortantes.

### **2.3.6 Aisladores**

#### **2.3.6.1.1 Definición**

Según la normativa E.031 (2019) se define como elemento estructural del sistema de aislamiento sísmico que es verticalmente rígido y horizontalmente flexible, y que permite grandes deformaciones laterales bajo sollicitaciones sísmicas (p. 3).

Adicionalmente, el comportamiento del aislador ayuda en la estructura para la reducción de demandas en los elementos principales, tales como las pilas.

### 2.3.6.1.1 Características

Según AASHTO (2010) se presenta las siguientes características:

#### Flexibilidad

La flexibilidad de la estructura se hace presente, mediante el incremento del periodo; en otras palabras, la aceleración inicial tiende a disminuir por el aumento del periodo.

#### Figura 15:

*Efecto de flexibilidad del aislamiento sísmico*

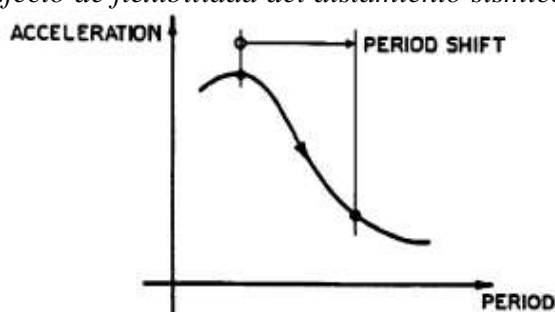
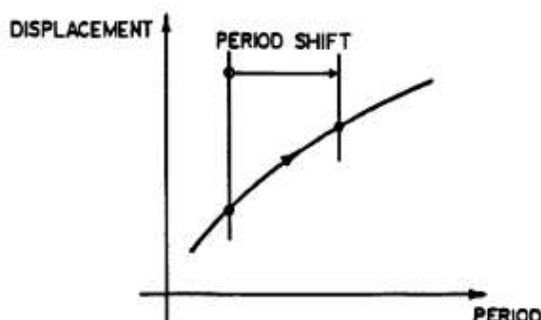


Figure C1-1—Typical Acceleration Response Curve



Nota: Tomado de *Guide specifications for seismic isolation design* por AASHTO, 2010 de AASHTO. (p. 2)

En la figura anterior, se presenta el aumento de periodo con su correspondiente disminución de periodo en la estructura.

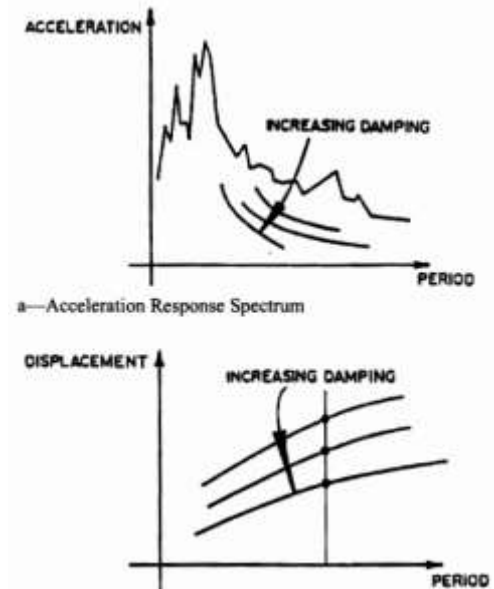
#### Disipación de energía

La disipación de energía está presente debido al incremento del amortiguamiento de la estructura, esto se correlaciona con el uso de la disipación viscosa de la energía, dependiente de la velocidad. Es decir, el incremento del amortiguamiento viscoso permite

la reducción de las aceleraciones provenientes de los espectros de demandas, tal como se presenta en la siguiente figura:

**Figura 16:**

*Efecto de disipación de energía por aislamiento sísmico.*

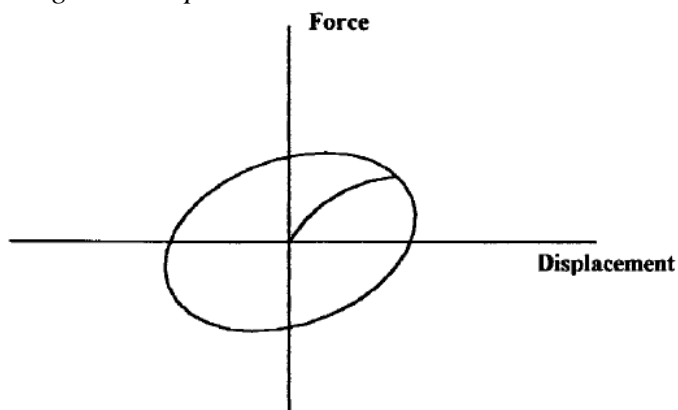


*Nota:* Tomado de *Guide specifications for seismic isolation design* por AASHTO, 2010 de AASHTO. (p. 3)

A continuación, se presenta el diagrama histerético del comportamiento de un aislador, donde se observa la fuerza aplicada y el desplazamiento, representada en la energía de disipación total.

**Figura 17:**

*Energía de disipación del aislador sísmico*



*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 230), por Chen et al, 2003, CRC Press.



### 2.3.6.1.1 Modelamiento estructural de estructuras aisladas

Según, Chen et al (2003), el modelamiento de la estructura aislada puede representarse como un sistema simplificado de un grado de libertad, siguiendo la formulación presentada:

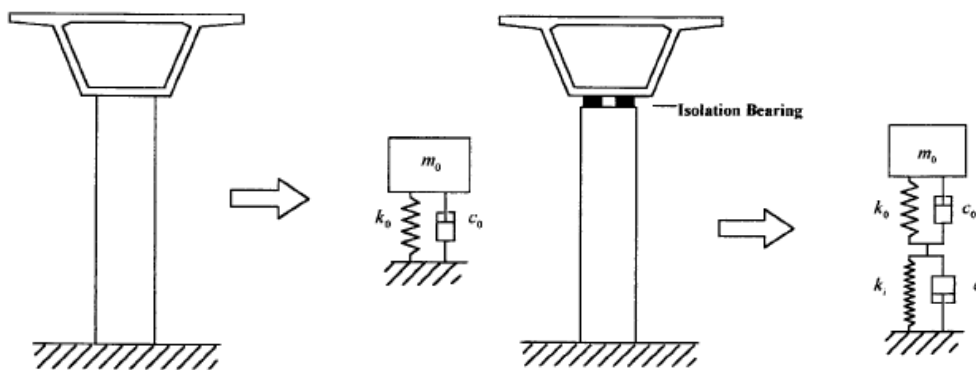
$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = -m_0 \ddot{y}_g$$

Donde  $m$  es la masa de la superestructura,  $k_0$  es la rigidez de la subestructura representada por un resorte,  $c_0$  es el amortiguamiento viscoso. La ecuación presentada se aplica cuando existe una aceleración de sismo en el suelo. Mientras para el cálculo del periodo fundamental  $T_0$  para completar un ciclo de vibración, se expresa como

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{k_0}}$$

El sistema de aislamiento sísmico puede ser representado por la adición de un sistema de amortiguamiento viscoso y la rigidez del aislador.

**Figura 18:**  
Representación de un grado de libertad con y sin aislador



Nota: Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 9-6), por Chen et al, 2003, CRC Press.

El sistema de rigidez equivalente del puente se obtiene como:

$$K = \frac{k_0 k_i}{k_0 + k_i}$$

Modificando la ecuación presentada inicialmente en esta sección, se plantea lo siguiente:

$$m_0 \ddot{x} + (c_0 + c_i) \dot{x} + Kx = -m_0 \ddot{x}_g$$

Siendo su periodo natural modificado:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0(k_0 + k_i)}{k_0 k_i}}$$

### 2.3.6.1.1 Efecto de la energía de disipación en la respuesta estructural

Según Chen et al (2003), el valor de coeficiente de amortiguamiento crítico  $c_c$  es definido de acuerdo al valor que previene a un sistema dinámico para una oscilación libre.

Este valor puede ser expresado:

$$c_c = 2\sqrt{m_0 k_0}$$

El valor del amortiguamiento puede ser expresado por un término relativo denominado índice de amortiguamiento  $\xi$ , que se refiere a la relación del amortiguamiento del sistema entre el amortiguamiento crítico.

$$\xi = \frac{c_0}{c_c} = \frac{c_0}{2\sqrt{m_0 k_0}}$$

El valor presente se entiende como un porcentaje del amortiguamiento crítico del sistema.

Para representar la fuerza adicional ocasionada por el aislador  $f(x, \dot{x})$  que es una función del desplazamiento y velocidad del sistema bajo el mecanismo de disipación de energía.

$$m_0 \ddot{x} + \frac{c_0}{m_0} \dot{x} + \frac{k_0}{m_0} x + \frac{f(x, \dot{x})}{m_0} = -\ddot{x}_g$$

Esta representación puede realizarse de manera práctica la representación de la rigidez efectiva del mecanismo de amortiguamiento por un índice de amortiguamiento.

Una de las formas es en relación a la energía disipada  $E_d$  por un ciclo de movimiento sobre una máxima deformación de energía unitaria  $E_{ms}$

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{4\pi E_{ms}}$$

El valor de  $E_d$  puede ser calculada de acuerdo al área de la curva histerética de la curva de disipación de energía, de manera que la ecuación general de movimiento pueda ser representada de acuerdo a los índices  $\xi_0$  y  $\xi_{eq}$ :

$$\ddot{x} + 2\sqrt{\frac{k_0}{m}} (\xi + \xi_{eq}) \dot{x} + \frac{k_0}{m_0} x = -\ddot{x}_g$$

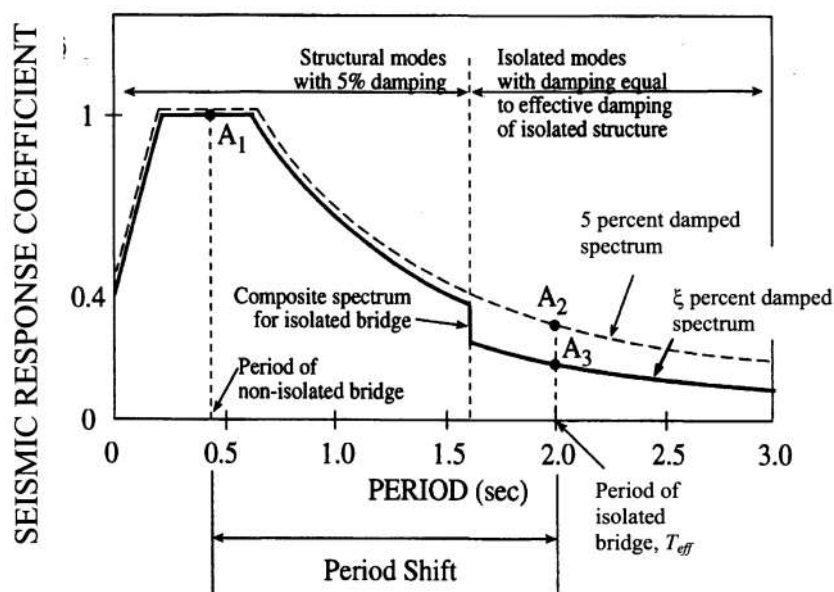
Este concepto puede aplicarse para un sistema multigrado considerando los valores de  $\xi_{eq}$  como amortiguamiento modal;  $E_d$  y  $E_{ms}$  como energía disipada para cada modo de vibración de la energía.

$$\xi_{eq}^i = \frac{E_d^i}{4\pi E_{ms}^i}$$

### 2.3.6.1.2 Espectro sísmico de Aislador

El espectro sísmico del aislador se compone en una zona de aislación con amortiguamiento efectivo de 5%, mientras la otra zona refiere al amortiguamiento directo del aislador. Al aplicarse el método de superposición se presenta el espectro de diseño resultante, lo que implica una reducción del coeficiente de aceleración espectral frente a eventos mayores al periodo fundamental con aislador. Esto se observa en la siguiente figura:

**Figura 19:**  
*Espectro sísmico con aislador*



Nota: Tomado de *Guide specifications for seismic isolation design* por AASHTO, 2010 de AASHTO. (p. 5)

Se observa el gráfico representativo de un sistema de aislamiento en base considerando la reducción del espectro sísmico, donde se considera un amortiguamiento efectivo dependiendo del tipo de aislador.

### 2.3.6.1.3 Métodos de análisis

La energía de disipación puede tratarse como un sistema equivalente viscoso de amortiguamiento y rigidez aislado como un sistema lineal. Este tipo análisis permite el desarrollo para métodos simple y multi modal.

#### Método unimodal espectral de análisis:

Se determina el valor de la fuerza sísmica  $C_s$  y la carga sísmica  $W$  de la superestructura aislada.

$$F = C_s W$$

$$C_s = \frac{\sum k_{eff} \times d_i}{W}$$

$$C_s = \frac{AS_i}{T_e B}$$

Donde:

$\sum k_{eff}$  = sumatoria lineal de las rigideces de los apoyos de la superestructura.

$d_i = \frac{10AS_iT_e}{B}$  = desplazamiento de los aisladores.

A= coeficiente de aceleración

B= El coeficiente de amortiguamiento.

Con los datos anteriores, se procede a calcular el periodo efectivo de la estructura  $T_e$ , siguiendo la siguiente fórmula:

$$T_e = \sqrt{\frac{W}{g \sum k_{eff}}}$$

### **Método de análisis espectral sísmico:**

En este método se utiliza el 5% de amortiguamiento efectivo siguiendo las presentes modificaciones:

- Los aisladores son representados con sus rigideces efectivas de acuerdo a un cálculo simplificado
- El análisis espectral modal utiliza los valores modificados de acuerdo al alto amortiguamiento de los aisladores, esto se observa en el desarrollo del espectro de respuesta.

#### **2.3.6.1.1 Tipos de aisladores**

##### **Elastoméricos**

Este tipo de aisladores son los más simples, hechos de goma de caucha, de formar rectangular o circular. Cuando se encuentra instalada en un puente sirve como apoyo vertical para cargas de servicio y como apoyo de tipo aislador para cargas laterales. Estos dispositivos al ser comparados con los neoprenos son mucho más gruesos para que

funcionen a través de la inserción de planchas metálicas que incrementan la rigidez del sistema.

Las propiedades de este tipo aisladores están dadas por área de apoyo  $A$ , módulo de corte  $G$ , altura  $h$ , máxima deformación por corte  $\gamma$ , y el módulo de forma  $K$ .

La rigidez vertical se calcula a través de la siguiente fórmula:

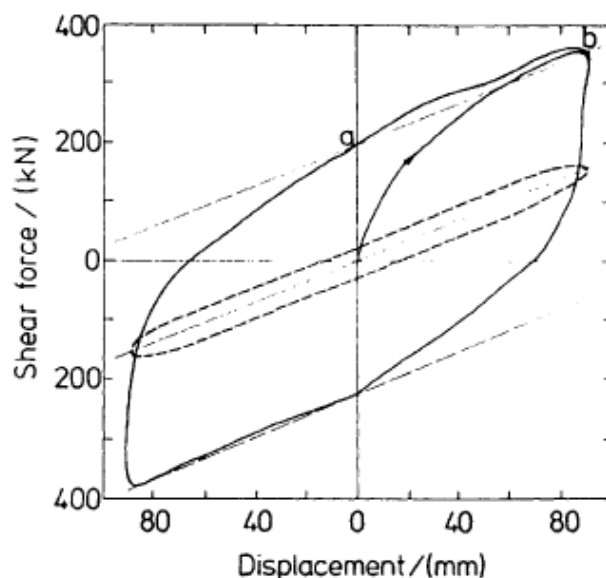
$$K = \frac{GA}{h}$$

Mientras, el periodo fundamental considerando los aisladores se calcula:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{Sh\gamma A'}{Ag}}$$

Uno de los problemas más frecuentes de este tipo de aisladores, que los apoyos pueden experimentar grandes deformaciones horizontales, perdiendo la estabilidad. Para mejorar estos dispositivos se colocan materiales que permitan la disipación de energía lineal-plástica como un núcleo de plomo, permitiendo una alta resistencia al corte inicialmente y poca resistencia a la fluencia en corte.

**Figura 20:**  
*Curva histerética en aisladores elastoméricos*



*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 9-10), por Chen et al, 2003, CRC Press.

## Deslizamiento

Este tipo de aisladores reducen la fuerza sísmica transferida desde la superestructura a la subestructura, permitiendo deslizar con una fricción. Este fenómeno de fricción permite reducir las fuerzas de la estructura mediante la disipación de energía. Este efecto puede ser aplicado con el uso de aisladores de péndulos de fricción, haciendo la superficie de fricción curva para restablecer el centro de los apoyos por las cargas permanentes.

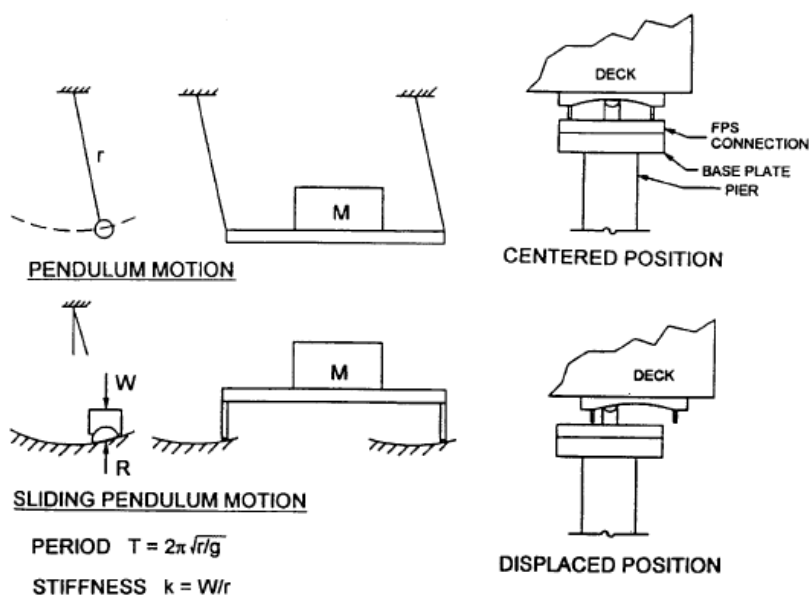
A continuación, se muestra el proceso simplificado de funcionamiento de este tipo de aisladores.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Donde el radio R, la aceleración de la gravedad g. En este sentido, se observa que el periodo del péndulo es independiente de la masa de la estructura. Si se requiere aumentar el periodo de la estructura, se aumenta el radio R de la superficie cóncava

### Figura 21:

*Efecto de péndulo representativo para aisladores de tipo deslizamiento*



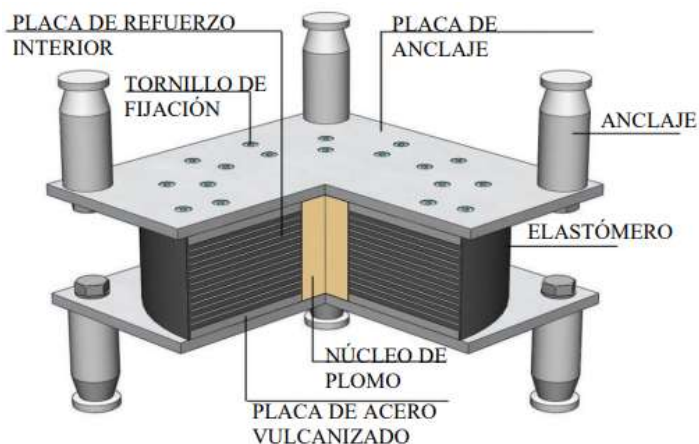
*Nota:* Tomado de *Bridge Engineering: Seismic Design* (p. 9-12), por Chen et al, 2003, CRC Press.

### 2.3.6.1.2 Aisladores LRB

Según Minchán (2016) indica que los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo, también conocido como Lead Rubber Bearings (LRB), son dispositivos de apoyo en elastómero armado. Se componen de capas alternas de acero y de elastómero conectados mediante vulcanización en caliente, con un núcleo central de plomo de forma cilíndrica (p. 81).

#### Figura 22:

*Aislador de base con núcleo de plomo LRB*

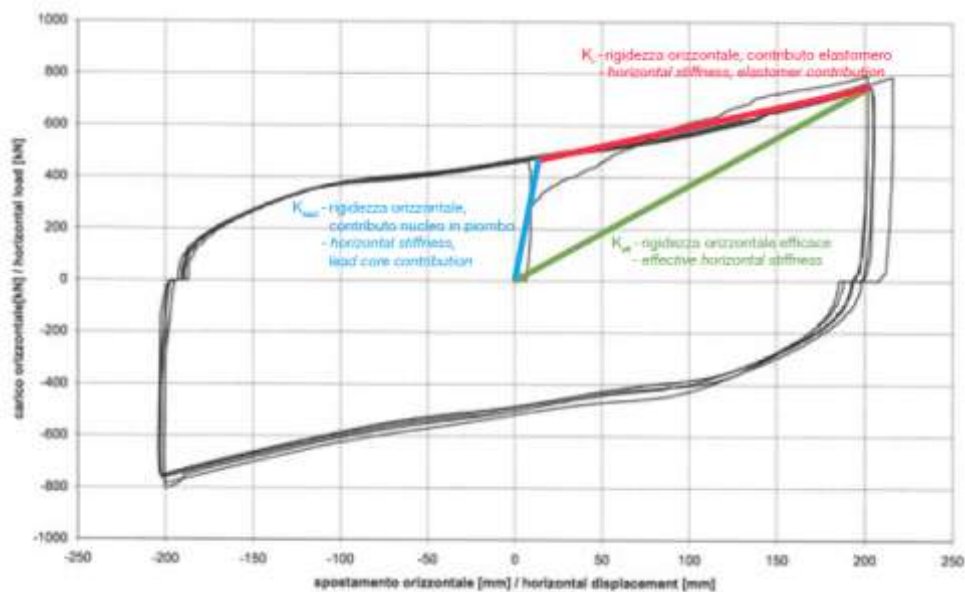


*Nota: Tomado de Comparación de la respuesta sísmica de puente viga losa, con y sin aisladores sísmicos por Minchán, 2016 (p. 81)*

A continuación, se presenta el diagrama típico de histéresis para el aislador de tipo LRB, donde se observa las cargas horizontales y el desplazamiento, que permite calcular la rigidez efectiva del sistema.



**Figura 23:**  
Comportamiento histerético del sistema LRB

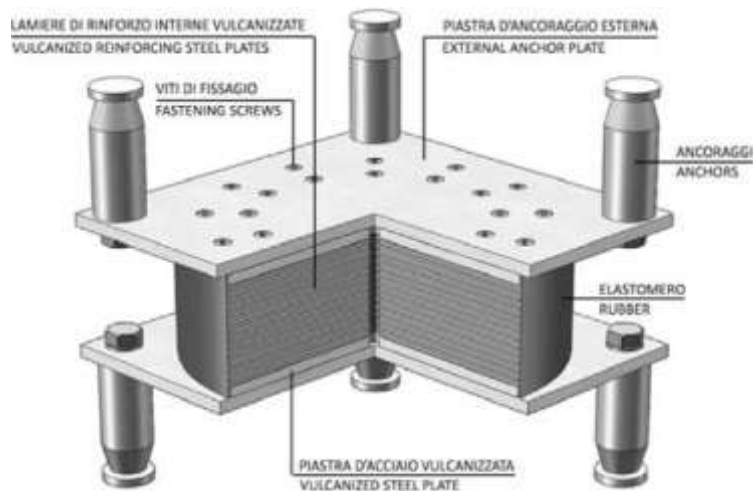


Nota: Tomado de *HDRB/LRB: High Damping Rubber Bearings/ Lead Rubber Bearings* por Alga, 2008 (p. 9)

### 2.3.6.1.1 Aisladores HDRB

Similar al aislador LRB, este aislador está compuesto de goma vulcanizada separada por capas de acero estructural, este sistema provee una alta rigidez vertical con un mínimo de compresión, permitiendo grandes desplazamientos horizontales. El efecto principal de este tipo de aislador es el incremento del periodo de vibración, reduciendo la actividad sísmica. (Alga, 2008).

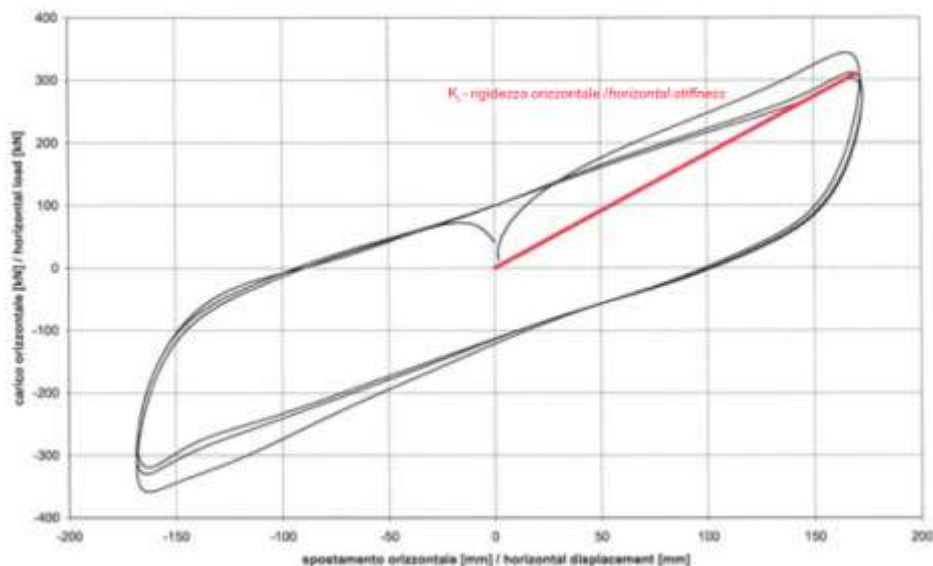
**Figura 24:**  
*Sistema HDRB de aislamiento*



*Nota:* Tomado de *HDRB/LRB: High Damping Rubber Bearings/Lead Rubber Bearings* por Alga, 2008 (p. 12)

A continuación, se presenta el diagrama típico de histéresis para el aislador de tipo HDRB, donde se observa las cargas horizontales y el desplazamiento, que permite calcular la rigidez efectiva del sistema.

**Figura 25:**  
*Comportamiento histerético del sistema HDRB*



*Nota:* Tomado de *HDRB/LRB: High Damping Rubber Bearings/Lead Rubber Bearings* por Alga, 2008 (p. 9)

## 2.4 Definición de términos básicos

**Aisladores sísmicos:** Dispositivos mecánicos que permiten la absorción de energía y brindan flexibilidad a la estructura (AASHTO, 2010)

**Respuesta sísmica:** Es aquella respuesta relacionada a la fuerza sísmica, esta depende de la aceleración del suelo. Además, se puede observar mediante desplazamientos, velocidades y aceleraciones. (Minchán, 2016).

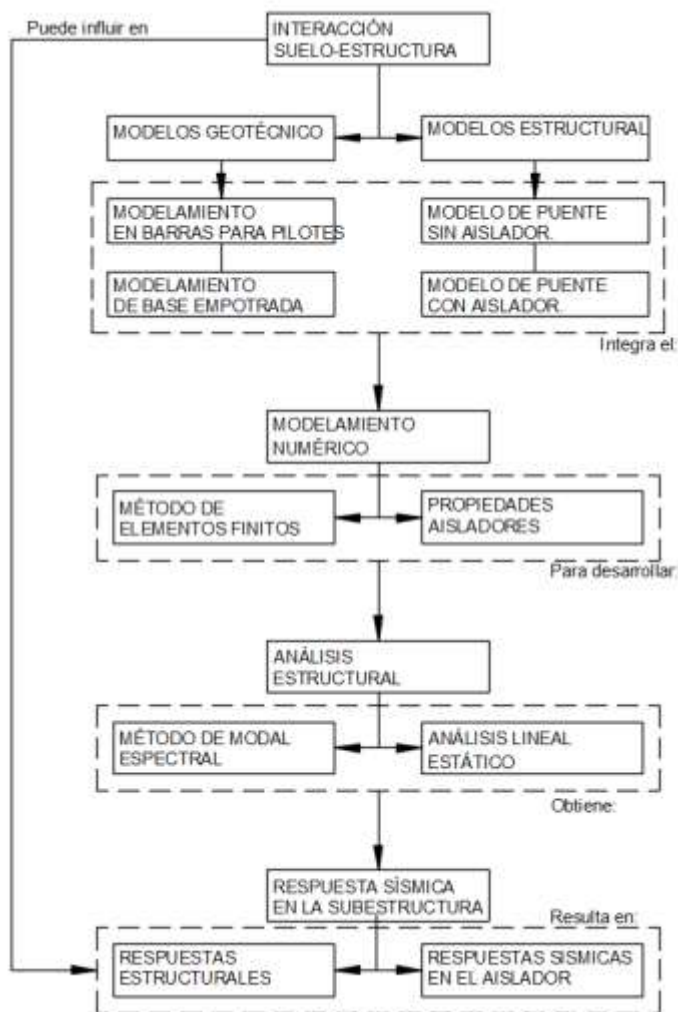
**Interacción suelo-estructura:** La interacción suelo estructura tiene como principal fin, permitir la participación del suelo dentro del análisis estructural. Esto se puede realizar gracias a la consideración de que el suelo se comporta similar a un resorte vertical en un modelo simple, o la consideración de más resortes para modelar un comportamiento completo. (López, 2012)

**Pilotes:** Elementos estructurales de acero, madera y concreto para cimentaciones de tipo profunda que resisten cargas verticales y horizontales, estos pueden ser diseñados en tipo punta y en fricción (Das, 2013)

## 2.5 Fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis

**Figura 26:**

Mapa conceptual de fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.



Nota: En la presente imagen se muestran las diferentes teorías que sustentan el estudio de esta investigación.

## 2.6 Hipótesis

### 2.6.1 General

- La interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.

### 2.6.2 Específicas

1. El modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.

2. El modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
3. El modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
4. El modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.

## 2.7 Variables

**Tabla 1:**

*Operacionalización de las variables*

Objetivo	Variable	
	Variable 1	Variable 2
	<b>X: Interacción suelo-estructura</b>	<b>Y: Respuesta sísmica de la subestructura de un puente con aisladores</b>
	<b>Dimensiones de X</b>	<b>Dimensiones de Y</b>
<b>Objetivo general:</b>	X1: Propiedades del suelo.	Y1: Respuestas estructurales.
Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	X2: Propiedades geométricas y mecánicas del puente.	Y2: Respuesta sísmica del aislador.
	<b>INDICADORES DE X</b>	<b>INDICADORES DE Y</b>
	X11: Propiedades constitutivas del suelo.	Y11: Desplazamientos.
	X12: Rigideces del suelo.	Y12: Fuerza Basal
	X21: Geometría del puente.	Y13: Periodo fundamental
	X22: Propiedades mecánicas de los materiales.	Y21: Desplazamiento relativo del aislador.
		Y23: Fuerza sísmica del aislador
	1. Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	
	2. Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	

- 
3. Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
- 
4. Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.
- 

*Nota:* Elaboración propia.

### **3. Marco metodológico**

#### **3.1 Tipo, método de investigación y diseño de la investigación**

##### ***3.1.1 Tipo de investigación***

La investigación es aplicada porque se aplicará directamente las teorías referentes a interacción suelo-estructura y diseño para aisladores sísmicos de tipo goma para el cálculo de las respuestas sísmicas de la subestructura.

El enfoque de la investigación es de tipo cualitativo porque las variables de estudio, tanto dependientes como independientes se pueden cualificar en unidades físicas de acuerdo a Hernández (2016), todo ello siguiendo el planteamiento de las hipótesis iniciales. Asimismo, las variables de estudio son de tipo descriptivo porque se estima desplazamientos, fuerzas cortantes y otros.

##### ***3.1.2 Método de investigación***

La investigación es de tipo analítica porque se realizará un análisis de los variables, específicamente de las respuestas sísmicas de la subestructura con aisladores sísmicos. Las propiedades del suelo y de la geometría en conjunto con los materiales serán tomados a partir de un estudio realizado en el año 2013, que permite realizar un análisis computacional dependiente de los valores analizados, para determinar la influencia de la interacción suelo-estructura con la propuesta de uso de sistema de protección sísmica (aisladores).

##### ***3.1.3 Diseño investigación***

La investigación será de tipo no experimental porque no se realizarán ensayos de laboratorio para analizar las respuestas sísmicas de los aisladores, ya que, el análisis será de tipo computacional con software estructural. De acuerdo a la cantidad de mediciones realizadas es de tipo transversal, puesto que se ha realizada una sola medición; el tiempo

de análisis será de tipo retrospectivo por el tiempo de medición que se realizó en el año 2013.

## **3.2 Población y muestra**

### **3.2.1 Población**

No aplica a la naturaleza de la investigación, sin embargo, consideraremos como grupo de estudio los puentes continuos de concreto con aisladores sísmicos.

### **3.2.2 Muestra**

La muestra de estudio es el **Puente Terminal Portuario de Chancay** ubicado en Chancay, Perú. Además, la muestra es de tipo no paramétrica.

## **3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **3.3.1 Técnicas de recolección de datos**

#### **3.3.1.1 Recopilación de información**

La recopilación de información será basada en visitas a campo realizadas por el autor, planos existentes e información geotécnica dentro de los cuales se tiene:

- Inspecciones técnicas
- Ensayos no destructivos: esclerometría
- Ensayos de caracterización dinámica experimental
- Planos existentes

#### **3.3.1.2 Análisis numérico y documental**

A partir de los datos obtenidos se procederá a realizar una recopilación de información referentes a lineamientos, parámetros, normativas y otros para la lograr la caracterización real del puente Terminal Portuario de Chancay. Por tanto, se realizará el estudio considerando normativas internacionales y nacionales para la representación de los dispositivos sísmicos junto con la interacción suelo-estructura.



### **3.3.2 Instrumentos**

#### **3.3.2.1 Ficha descriptiva de datos**

Los datos obtenidos de acuerdo a la inspección técnica serán almacenados para un correcto orden, dentro de las fichas se colocarán los datos de suelo, geometría y materiales.

#### **3.3.3 Validez de instrumentos**

Los instrumentos realizados en el presente estudio serán validados de acuerdo al juicio de expertos para asegurar una correcta confiabilidad de resultados. Sin embargo, el uso de fichas de recolección de datos junto de guías de observación son documentos de difusión internacional para investigaciones de diversos campos.

### **3.4 Descripción de procedimientos de análisis de datos**

Primero, se procede a realizar la recopilación de información existente de acuerdo a las visitas técnicas realizadas por el autor, en donde se definirá la geometría y propiedades de los materiales para un modelamiento real. Además, se procedió a realizar un ensayo de caracterización dinámica para la calibración del modelo existente que posteriormente arrojará las respuestas dinámicas de la estructura.

Segundo, a través de los datos obtenidos, se realizó el modelamiento numérico que considera la geometría, materiales y el tipo de suelo de apoyo. Similar caso, se procederá a modelar el aislador sísmico de tipo goma de alto impacto para la predicción de respuestas sísmicas.

Finalmente, los resultados obtenidos del modelo numérico propuesto serán analizados de acuerdo a las hipótesis planteadas.

## 4. Resultados

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Descripción del modelo

##### 4.1.1.1 Propiedades del suelo

Los parámetros y propiedades del suelo se obtuvieron a través de una campaña geotécnica y geológica para el proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay”. En esta campaña se realizaron diversos ensayos tales como: excavación de calicatas, perforaciones diamantinas, ensayos de penetración dinámica superpesada (DPSH), ensayos geofísicos, ensayos de refracción sísmica y ensayos MASW.

El perfil longitudinal constituye una interpretación basada en los datos generados a partir de las campañas realizadas los meses de enero, febrero y abril del año 2019

#### Figura 27:

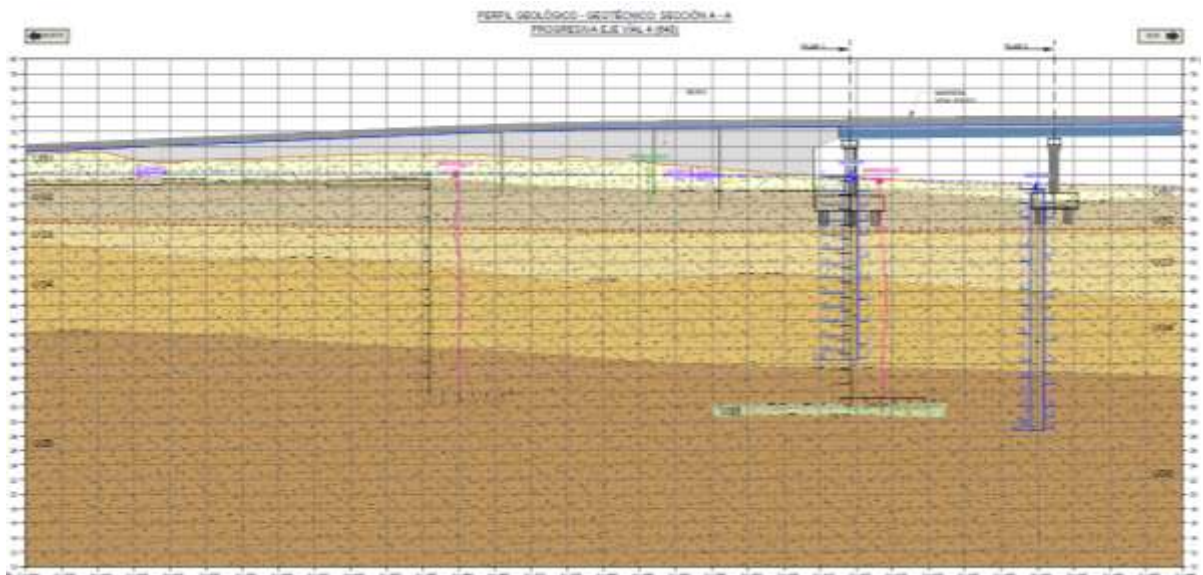
*Geología local y planta de los perfiles geológicos - geotécnicos.*



*Nota:* Geología local y planta de los perfiles de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

**Figura 28:**

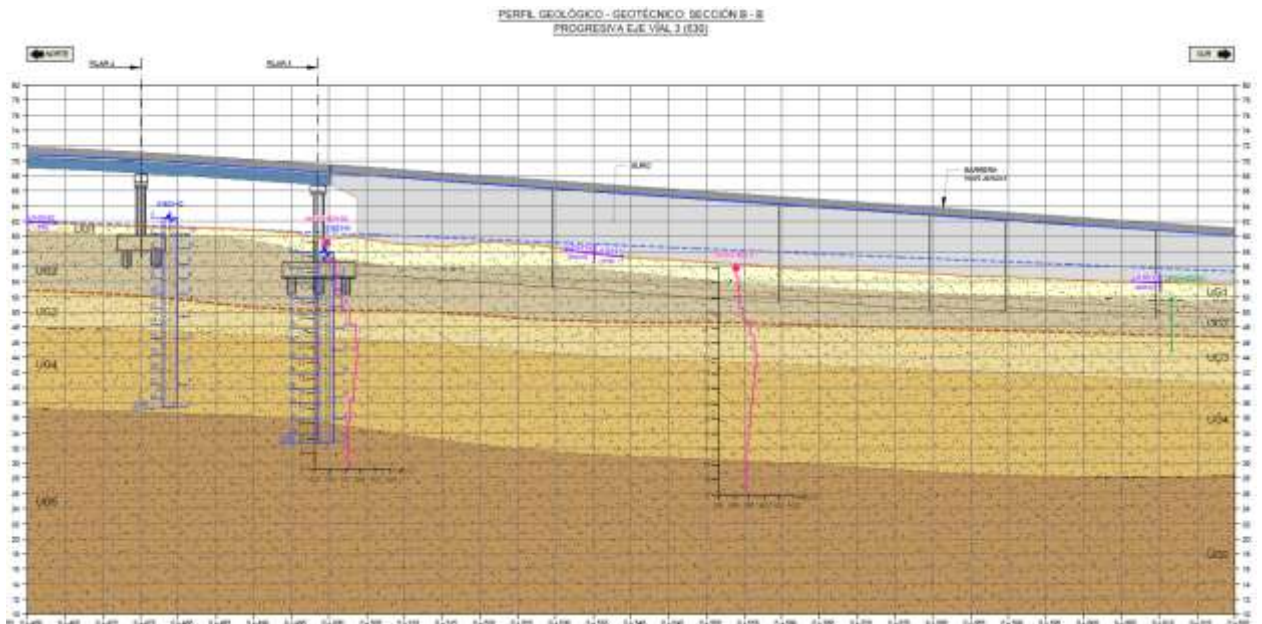
*Perfil geológico - geotécnico: sección A – A*



*Nota:* Sección representativo A-A de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

**Figura 29:**

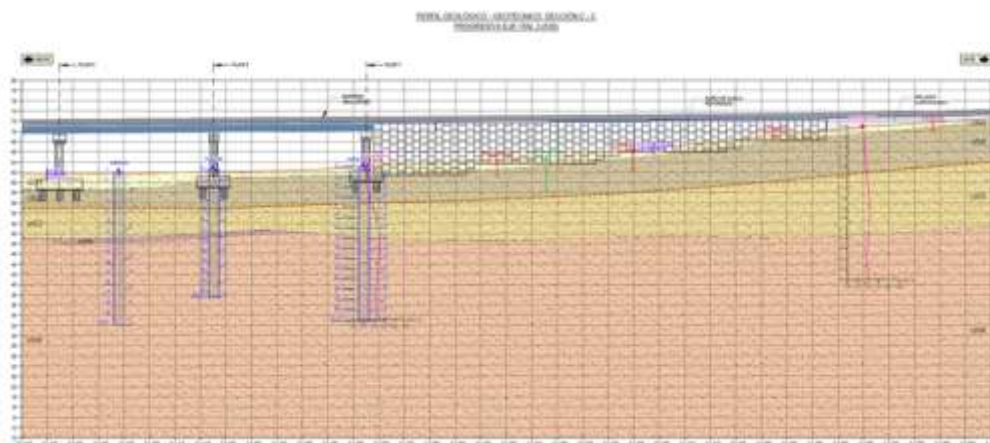
*Perfil geológico - geotécnico: sección B – B*



*Nota:* Sección representativo B-B de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

**Figura 30:**

*Perfil geológico - geotécnico: sección C – C*



*Nota:* Sección representativa C-C de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

En las siguientes tablas se muestran la litoestratigráfica de los perfiles geológicos -geotécnicos presentados anteriormente:

**Tabla 2:**

*Litoestratigrafía*

LITOESTRATIGRAFÍA	
UG: UNIDAD GEOLÓGICA GEOTÉCNICA INTERPRETADA	
UG1	UG1: PRESENCIA DE RELLENO NO CONTROLADO, CON ALGUNAS RAÍCES EN DESCOMPOSICIÓN: 70% ARENA MAL GRADADA, MEDIA A FINA, COLOR GRIS PARDO OSCURO, HÚMEDA, 30% DE GRAVA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA, TAMAÑO MÁXIMO 3".
UG2	UG2: ARENAS LIMOSA, MEDIA A FINA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA, COLOR GRIS MARRÓN OSCURO, HÚMEDO, FINOS LIMOSOS NO PLÁSTICOS, COMPACIDAD DENSA.
UG3	UG3: ARENAS LIMOSA, MEDIA A FINA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA, COLOR GRIS MARRÓN OSCURO, HÚMEDO, FINOS LIMOSOS NO PLÁSTICOS, COMPACIDAD MUY DENSA.
UG4	UG4: ARENA MAL GRADADA CON LIMO, APROXIMADAMENTE 70% DE ARENA, MEDIA A FINA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA, COLOR GRIS PARDO OSCURO, HÚMEDA, APROXIMADAMENTE 30% DE FINOS LIMOSOS, NO PLÁSTICOS, COMPACIDAD MUY DENSA.
UG5	UG5: ARENAS LIMOSA, MEDIA A FINA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA, COLOR GRIS MARRÓN OSCURO, HÚMEDO, FINOS LIMOSOS NO PLÁSTICOS, COMPACIDAD MUY DENSA.
UG6	UG6: APROXIMADAMENTE 70% LIMO ARENOSO, DE BAJA PLASTICIDAD, CONSISTENCIA DURA, COLOR GRIS MARRÓN CLARO, HÚMEDO, APROXIMADAMENTE 30% DE ARENA, MEDIA A FINA, SUBANGULOSA A SUBREDONDEADA.

*Nota:* Litoestratigrafía de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

**Tabla 3:**

*Parámetros de resistencia*

PARAMETROS DE RESISTENCIA			
UNIDAD GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA	PESO UNITARIO (kN/m <sup>3</sup> )	COHESIÓN (kPa)	Ø
UG1	16	0	28
UG2	17	0	31
UG3	18	0	38
UG4	18	0	41

*Nota:* Tabla de parámetros de resistencia del suelo de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

#### 4.1.1.2 Geometría y propiedades del puente

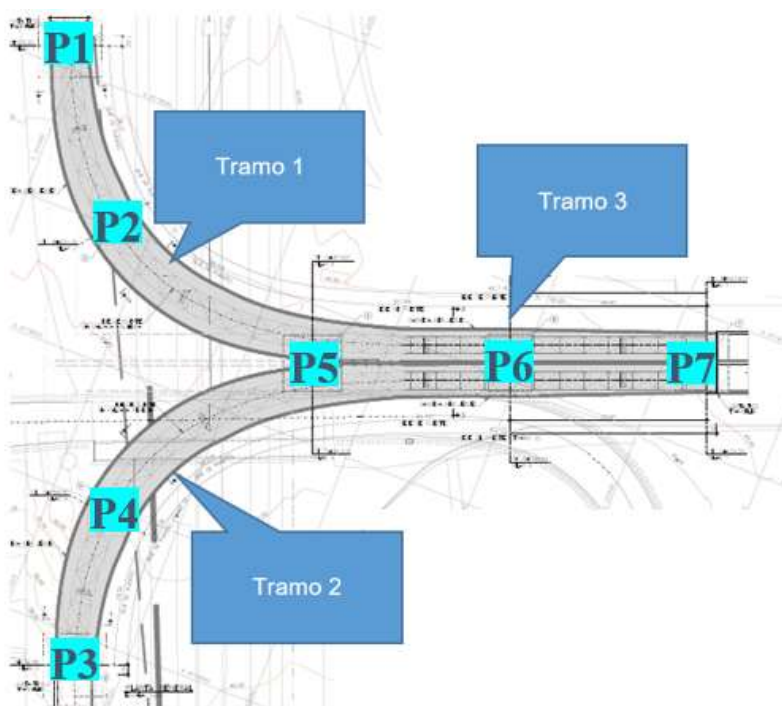
Para esta investigación se utilizó la geometría del puente “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” ubicado en el departamento de Lima, Perú. En este apartado se presenta la geometría de la superestructura, subestructura, elevaciones y una sección.

##### 4.1.1.2.1 Geometría del puente

La estructura proyectada se adapta al trazo curvo de la vía. En la siguiente figura se puede observar la vista en planta de la estructura, el cual será dividido en tres tramos para una mejor descripción del proyecto.

**Figura 31:**

*Planta de puente*



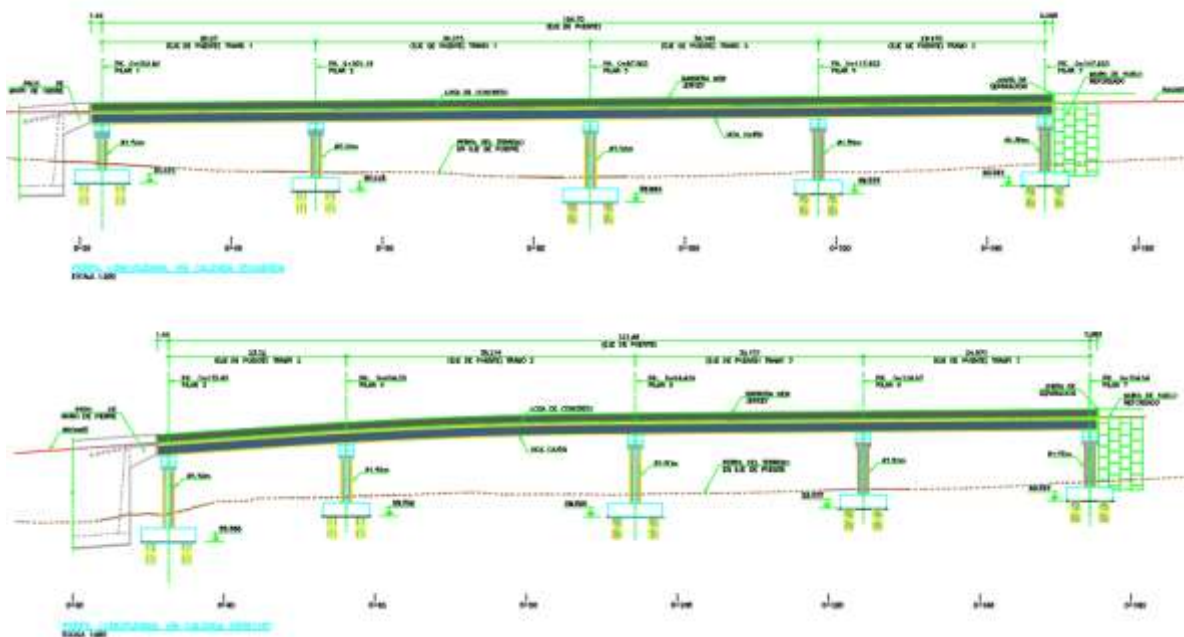
*Nota:* Planta de puente de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

Los tramos 1 y 2 consisten en un tablero de sección mixta, en dichos tramos se emplea una viga cajón metálica de 1.35m de altura media. El ancho del tablero es variable de 5.80m hasta 8.10m debido al desarrollo del sobreancho, la losa es de 0.25m de espesor. Los tramos son continuos. Para el tramo 1 los vanos son de longitudes 28.27 m y 36.32 m. Para el tramo 2 los vanos son 23.52 m y 38.22 m.

El tramo 3, es producto de la unión de los tramos 1 y 2. Consiste en un tablero de sección mixta con 2 vigas cajón metálicas de altura media 1.35m, la losa es de 0.25m de espesor. El ancho del tablero permite disponer de barreras de protección tipo New Jersey con nivel de contención TL5. Los vanos del tramo 3 son de longitudes 30.15 m y 29.97 m.

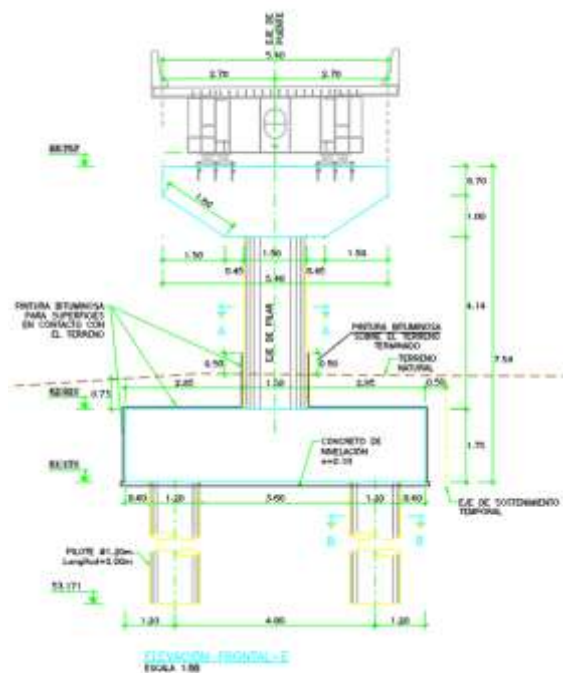
### Figura 32:

#### *Elevación de puente*



*Nota:* Elevación de puente de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

La subestructura de los tramos 1 y 2 consiste en pilares de una columna, la subestructura del tramo 3 consiste en pilares de 2 columnas. La cimentación de los pilares es con encepados y pilotes de 1.20 m de diámetro.

**Figura 33:***Sección transversal de puente*

*Nota:* Sección transversal de puente de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

#### 4.1.1.2.2 *Propiedades de los materiales*

El acero para emplearse en la fabricación de la estructura metálica será:

**Tabla 4:***Propiedades de los materiales del puente*

Resistencia a compresión del concreto en losa inferior en viga	<b>40MPa</b>
Resistencia a compresión del concreto en resto	28MPa
Armadura estructural (ASTM A706 grado 50)	420MPa
Armadura pasiva (ASTM A615 grado 60)	420MPa

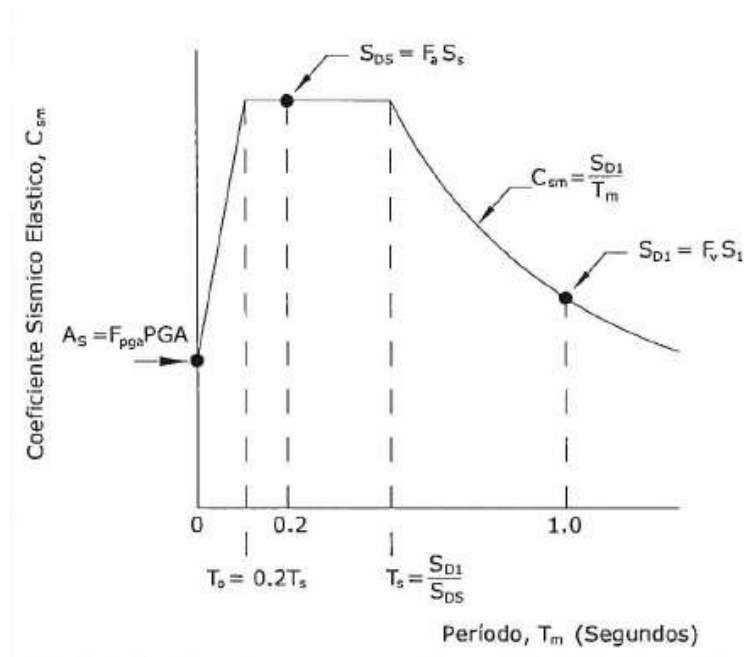
*Nota:* Propiedades de los materiales acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

### 4.1.1.3 Sismo

Los efectos sísmicos sobre la estructura del puente serán analizados de acuerdo a lo establecido en el Manual de Diseño de Puentes (MTC) y Guide Specifications for Seismic Isolation Design (AASHTO).

**Figura 34:**

*Espectro de respuesta según Manual del MTC.*



*Nota:* Espectro de respuesta representativo al proyecto.

Los valores del espectro se definen de la siguiente manera:

Coefficientes de aceleración

- PGA: Coeficiente de aceleración pico en terreno tipo B (Roca)
- $S_s$ : Coeficiente de aceleración espectral para un periodo de 0.20s
- $S_1$ : Coeficiente de aceleración espectral para un periodo de 1.00s

Factores de sitio

- $F_{pga}$ : Factor de sitio para la aceleración pico
- $F_a$ : Factor de sitio para la aceleración de periodo 0.20s
- $F_v$ : Factor de sitio para la aceleración de periodo 1.00s



Definición de los puntos principales del espectro

- $A_s = F_{pga} PGA$
- $S_{DS} = F_a S_s$
- $S_{D1} = F_v S_1$

Periodos que definen la meseta del espectro

- $T_s = S_{D1} / S_{DS}$
- $T_o = 0.2T_s$

Para valores intermedios de periodos las aceleraciones se definen de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$C_{sm}(T_m) = \begin{bmatrix} A_s + (S_{DS} - A_s) \cdot \frac{T_m}{T_o} & \text{si } T_m \leq T_o \\ S_{DS} & \text{si } T_o < T_m \leq T_s \\ \frac{S_{D1}}{T_m} & \text{si } T_m > T_s \end{bmatrix}$$

**Figura 35:**

*Hoja de cálculo para el Espectro sísmico longitudinal del puente TPCH*

**ESPECTRO SISMICO LONGITUDINAL  
PUENTE TPCH**

---

**ESPECTRO DE DISEÑO**

Los parámetros que definen el espectro de diseño para efectos del sismo, de acuerdo al Estudio de Peligro Sísmico desarrollado para el proyecto, son los siguientes:

	Tipo de suelo "B"
Coefficiente de aceleración pico:	PGA := 0.51
Coefficiente de aceleración espectral para un periodo de 0.20s:	$S_S := 1.26$
Coefficiente de aceleración espectral para un periodo de 1.00s:	$S_1 := 0.51$
Factor de sitio para un periodo de aceleración espectral de 0.00s:	$F_{pga} := 1.00$
Factor de sitio para rangos de periodos cortos de aceleración espectral:	$F_a := 1.00$
Factor de sitio para rangos de periodos largos de aceleración espectral:	$F_v := 1.30$

Según lo especificado en el AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design [3.4.1], se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 A_S &:= F_{pga} \cdot PGA = 0.51 & S_{D1} &:= F_v \cdot S_1 = 0.663 \\
 S_{DS} &:= F_a \cdot S_S = 1.26 & T_S &:= \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0.526 & T_o &:= 0.20 \cdot T_S = 0.105
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el coeficiente de respuesta sísmico elástico será:

$$C_{sm}(T_m) := \begin{cases} A_S + (S_{DS} - A_S) \cdot \frac{T_m}{T_o} & \text{if } T_m < T_o \\ S_{DS} & \text{if } T_o < T_m < T_S \\ \frac{S_{D1}}{T_m} & \text{otherwise} \end{cases}$$

*Nota:* Hoja de cálculo desarrollada para el espectro sísmico de respuesta longitudinal del puente TPCH en Mathcad v15.

**Figura 36:**

*Hoja de cálculo para el Espectro sísmico transversal del puente TPCH*

**ESPECTRO SISMICO TRANSVERSAL  
PUENTE TPCH**

---

**ESPECTRO DE DISEÑO**

Los parámetros que definen el espectro de diseño para efectos del sismo, de acuerdo al Estudio de Peligro Sísmico desarrollado para el proyecto, son los siguientes:

	Tipo de suelo "B"
Coefficiente de aceleración pico:	PGA := 0.51
Coefficiente de aceleración espectral para un periodo de 0.20s:	S <sub>S</sub> := 1.26
Coefficiente de aceleración espectral para un periodo de 1.00s:	S <sub>1</sub> := 0.51
Factor de sitio para un periodo de aceleración espectral de 0.00s:	F <sub>pga</sub> := 1.00
Factor de sitio para rangos de periodos cortos de aceleración espectral:	F <sub>a</sub> := 1.00
Factor de sitio para rangos de periodos largos de aceleración espectral:	F <sub>v</sub> := 1.30

Según lo especificado en el AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design [3.4.1], se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 A_S &:= F_{pga} \cdot PGA = 0.51 & S_{D1} &:= F_v \cdot S_1 = 0.663 \\
 S_{DS} &:= F_a \cdot S_S = 1.26 & T_S &:= \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0.526 & T_o &:= 0.20 \cdot T_S = 0.105
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el coeficiente de respuesta sísmico elástico será:

$$C_{sm}(T_m) := \begin{cases} A_S + (S_{DS} - A_S) \cdot \frac{T_m}{T_o} & \text{if } T_m < T_o \\ S_{DS} & \text{if } T_o < T_m < T_S \\ \frac{S_{D1}}{T_m} & \text{otherwise} \end{cases}$$

*Nota:* Hoja de cálculo desarrollada para el espectro sísmico de respuesta transversal del puente TPCH en Mathcad v15.

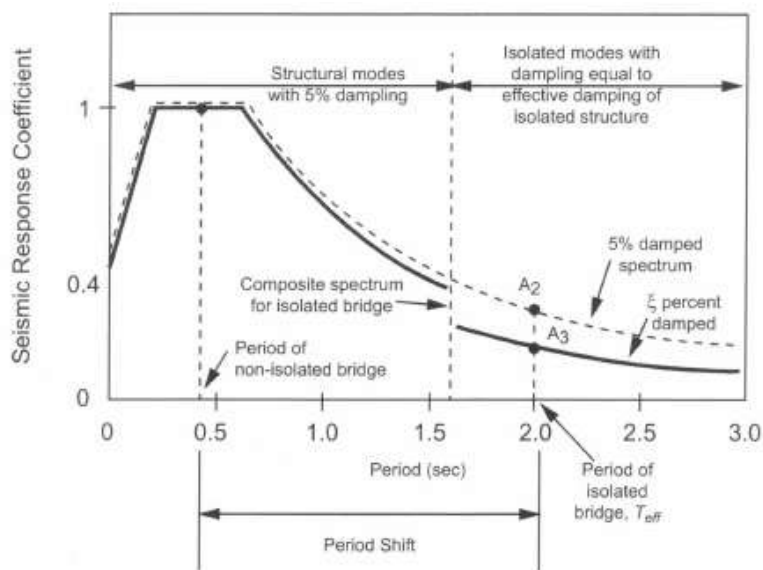
#### 4.1.1.4 Aislador Sísmico

En el Apartado 7.3 de Guide Specifications for Seismic Isolation Design. Se establece que, para usar el método de análisis multimodal espectral, el espectro de respuesta para el 5% de amortiguamiento podrá ser escalado por el coeficiente de amortiguación (BL), para incluir la amortiguación efectiva del sistema de aislamiento para los modos de vibración aislados. El escalamiento por el coeficiente de amortiguamiento será aplicado sólo para periodos mayores a  $0.80T_{eff}$ .

En la siguiente figura de Guide Specifications for Seismic Isolation Design, se muestra un esquema del espectro sísmico compuesto para puentes aislados.

**Figura 37:**

*Espectro sísmico compuesto para puentes aislados*



*Nota:* Tomado de *Guide specifications for seismic isolation design* por AASHTO, 2010 de AASHTO. (p. 5)

**Figura 38:***Hoja de cálculo de espectros longitudinales para diferentes amortiguamientos***Espectros para diferentes amortiguamientos**

En la mayor parte de las normas sísmicas, se presentan espectros de diseño para un factor de amortiguamiento del 5%, este factor es muy adecuado para estructuras de concreto armado en las que se espera un agrietamiento considerable en los elementos estructurales ante un sismo severo. Sin embargo, cuando se diseñan estructuras de concreto armado o acero con dispositivos de disipación de energía, se necesita tener espectros para otros valores de amortiguamiento.

Los factores  $B_0$  y  $B_1$  multiplicarán a las formas de los espectros hallados para un 5% de amortiguamiento a fin de obtener espectros para cualquier factor de amortiguamiento  $\xi$ .

$$B_0 = 2 \left[ \frac{1 + \xi}{1 + 14.68(\xi)^{0.865}} \right] \quad B_1 = \left( \frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4}$$

Donde, el factor  $B_0$  multiplicará a los espectros propuestos con amortiguamiento menores al 5%. Análogamente, se empleará el factor  $B_1$  a fin de obtener espectros con amortiguamiento mayores al 5%.

$$T_{\text{eff}} = 1.12s$$

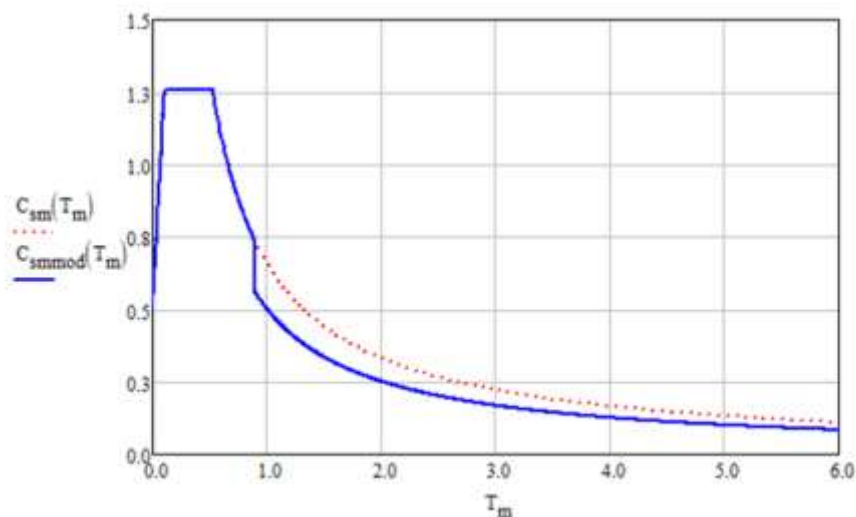
Periodo efectivo de la estructura amortiguada considerando la rigidez modificada, establecida en AASHTO.

$$\xi = 10\%$$

Amortiguamiento de los apoyos tipo HDRB

$$B_1 = \left( \frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} = 0.738$$

$$C_{\text{smmod}}(T_m) = \begin{cases} C_{\text{sm}}(T_m) & \text{if } T_m < 0.80 \left( \frac{T_{\text{eff}}}{1s} \right) \\ B_1 \cdot C_{\text{sm}}(T_m) & \text{otherwise} \end{cases}$$



*Nota:* Hoja de cálculo desarrollada para el espectro sísmico de respuestas longitudinales con amortiguamiento del puente TPCB en Mathcad v15.

**Figura 39:***Hoja de cálculo de espectros transversales para diferente amortiguamiento***Espectros para diferentes amortiguamientos**

En la mayor parte de las normas sísmicas, se presentan espectros de diseño para un factor de amortiguamiento del 5%, este factor es muy adecuado para estructuras de concreto armado en las que se espera un agrietamiento considerable en los elementos estructurales ante un sismo severo. Sin embargo, cuando se diseñan estructuras de concreto armado o acero con dispositivos de disipación de energía, se necesita tener espectros para otros valores de amortiguamiento.

Los factores B0 y B1 multiplicarán a las formas de los espectros hallados para un 5% de amortiguamiento a fin de obtener espectros para cualquier factor de amortiguamiento  $\xi$ .

$$B_0 = 2 \left[ \frac{1 + \xi}{1 + 14.68(\xi)^{0.865}} \right] \quad B_1 = \left( \frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4}$$

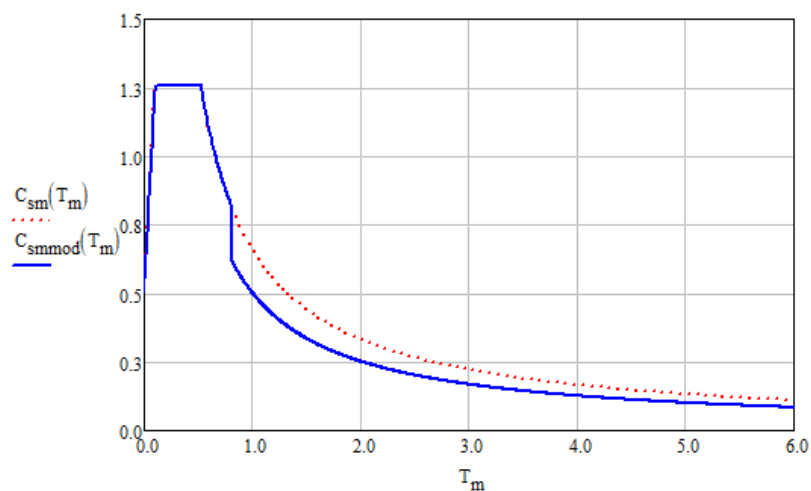
Donde, el factor B0 multiplicará a los espectros propuestos con amortiguamiento menores al 5%. Análogamente, se empleará el factor B1 a fin de obtener espectros con amortiguamiento mayores al 5%.

$T_{\text{eff}} := 1.02\text{s}$                       Periodo efectivo de la estructura amortiguada considerando la rigidez modificada, establecida en AASHTO.

$\xi := 10\%$                               Amortiguamiento de los apoyos tipo HDRB

$$B_1 := \left( \frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} = 0.758$$

$$C_{\text{smmod}}(T_m) := \begin{cases} C_{\text{sm}}(T_m) & \text{if } T_m < 0.80 \cdot \left( \frac{T_{\text{eff}}}{1\text{s}} \right) \\ B_1 \cdot C_{\text{sm}}(T_m) & \text{otherwise} \end{cases}$$



*Nota:* Hoja de cálculo desarrollada para el espectro sísmico de respuestas transversales con amortiguamiento del puente TPCB en Mathcad v15.

Los factores de modificación de respuesta para las subestructuras, serán acorde a lo establecido en el Apartado 6 de Guide Specifications for Seismic Isolation Design.

Para el diseño de los elementos de la subestructura consideramos los siguientes factores de modificación:

- Diseño de pilares y cabezales  $R = 1.50$
- Diseño de pilotes y encepado  $R = 1.00$

#### 4.1.1.5 Modelamiento numérico

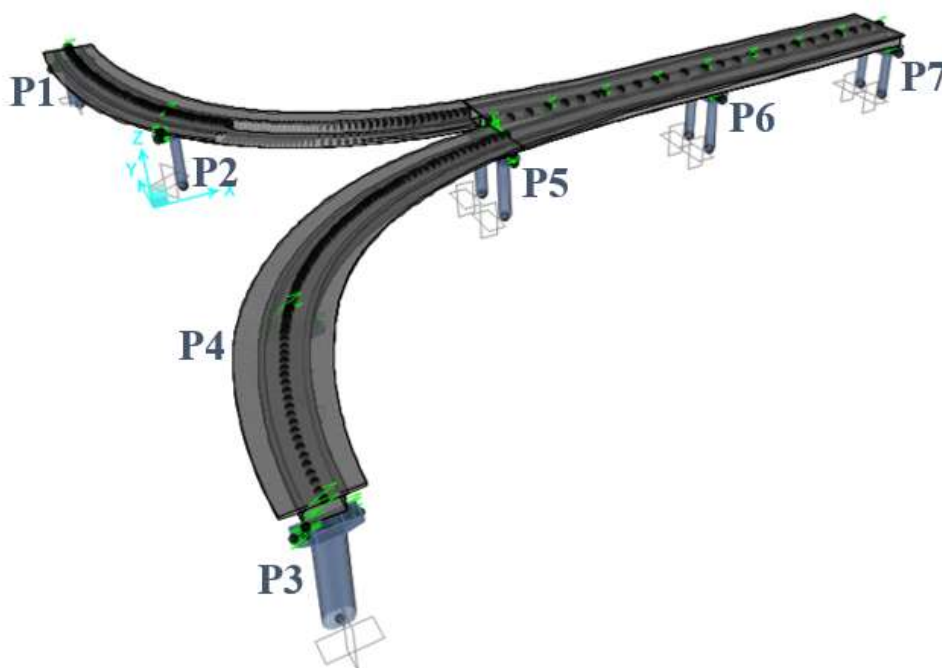
##### 4.1.1.5.1 Modelamiento del puente con base empotrada

Se realizó un modelo 3D para representar correctamente las rigideces de los elementos y la distribución de masas, debido a que el viaducto es irregular en planta y elevación.

El modelo tiene la viga y losa con elementos tipo Shell, mientras que las columnas han sido elementos tipo frame, en la base con un tipo de apoyo empotrado. El software utilizado para el modelamiento del puente es CSBridge V22.1, la viga y losa son elementos tipo Shell.

#### Figura 40:

*Definición de la geometría en 3D-Base empotrada*



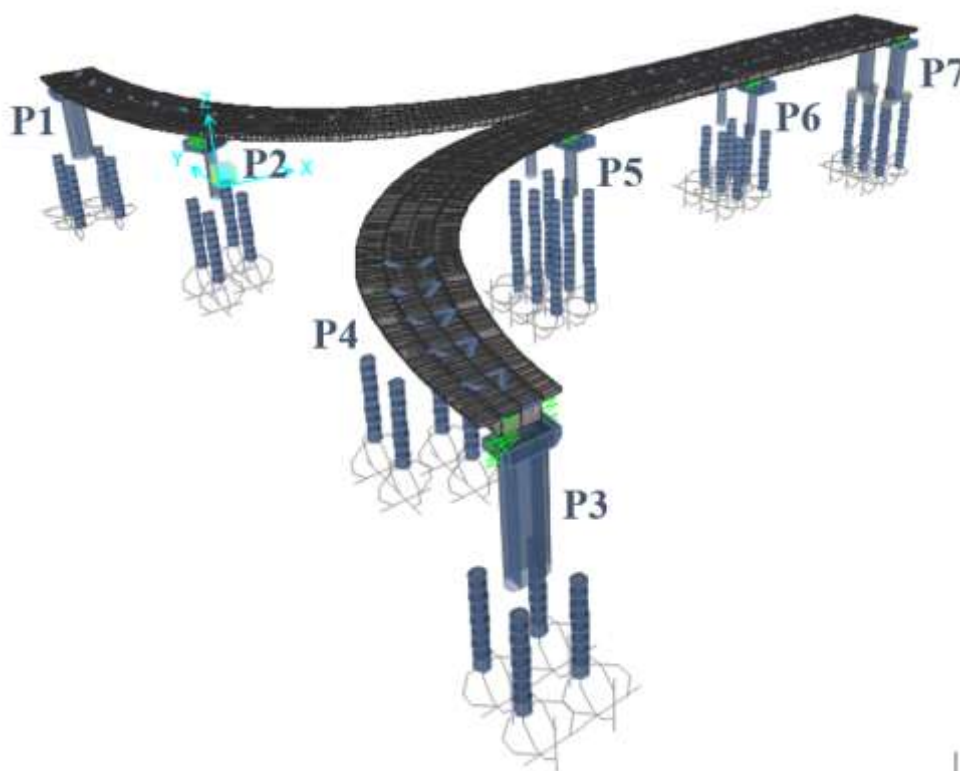
*Nota:* Modelo de puente en 3D desarrollado en CSI Bridge v22 con base empotrada.

#### 4.1.1.5.2 Modelamiento del puente con base flexible

El modelamiento del puente es similar a lo descrito en el capítulo anterior 4.1.1.2.1; sin embargo, la gran diferencia se encuentra en la base flexible, para ello se adicionó el modelamiento de los pilotes con variación de su rigidez cada metro de profundidad.

#### Figura 41:

*Definición de la geometría en 3D-Base flexible*



*Nota:* Modelo de puente en 3D desarrollado en CSI Bridge v22 con suelo flexible.

#### 4.1.1.5.3 Modelamiento del suelo

La interacción suelo estructura entre los pilotes y el suelo se representó mediante la modelización de los resortes o links, cuya rigidez se introdujo en el modelo estructural, esta rigidez también se le conoce como coeficiente de balasto, que simula las reacciones del terreno frente a los movimientos de la estructura.



De acuerdo con la NAVFAC DM702, para suelos granulares, puede suponerse que la relación fuerza-desplazamiento (constante del muelle que representa el terreno en una longitud de pilote  $\Delta L$ ) es:

$$K_h = f \frac{z}{D}$$

Dónde:

$K_h$ : Rigidez horizontal del pilote aislado para suelos arenosos.

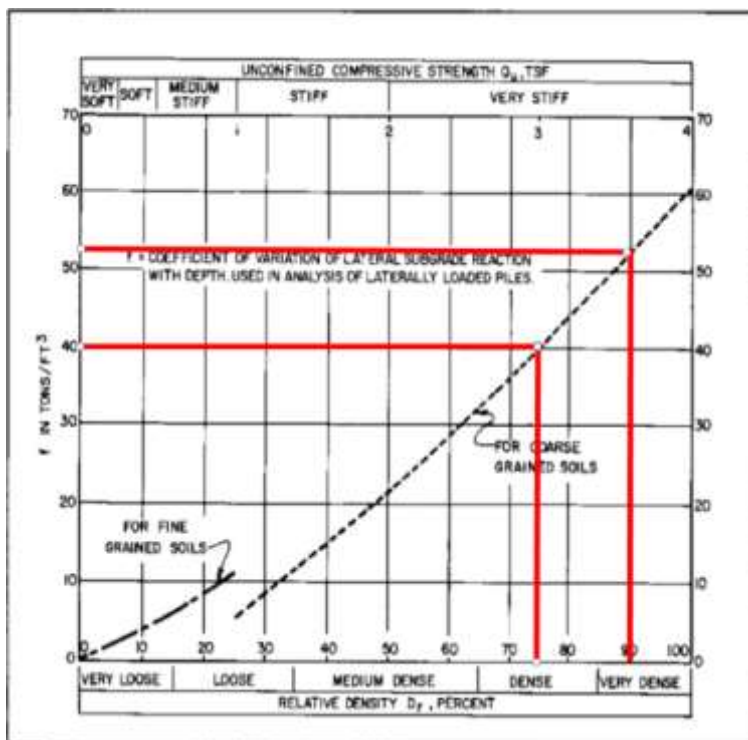
$f$ : Coeficiente que puede obtenerse de la Ilustración 16.

$z$ : Profundidad bajo la superficie del terreno del centro del tramo de pilote (de longitud  $\Delta L$ ) en cuestión.

$D$ : Diámetro del pilote

### Tabla 5:

Valores de  $f$  en función de la densidad relativa del suelo

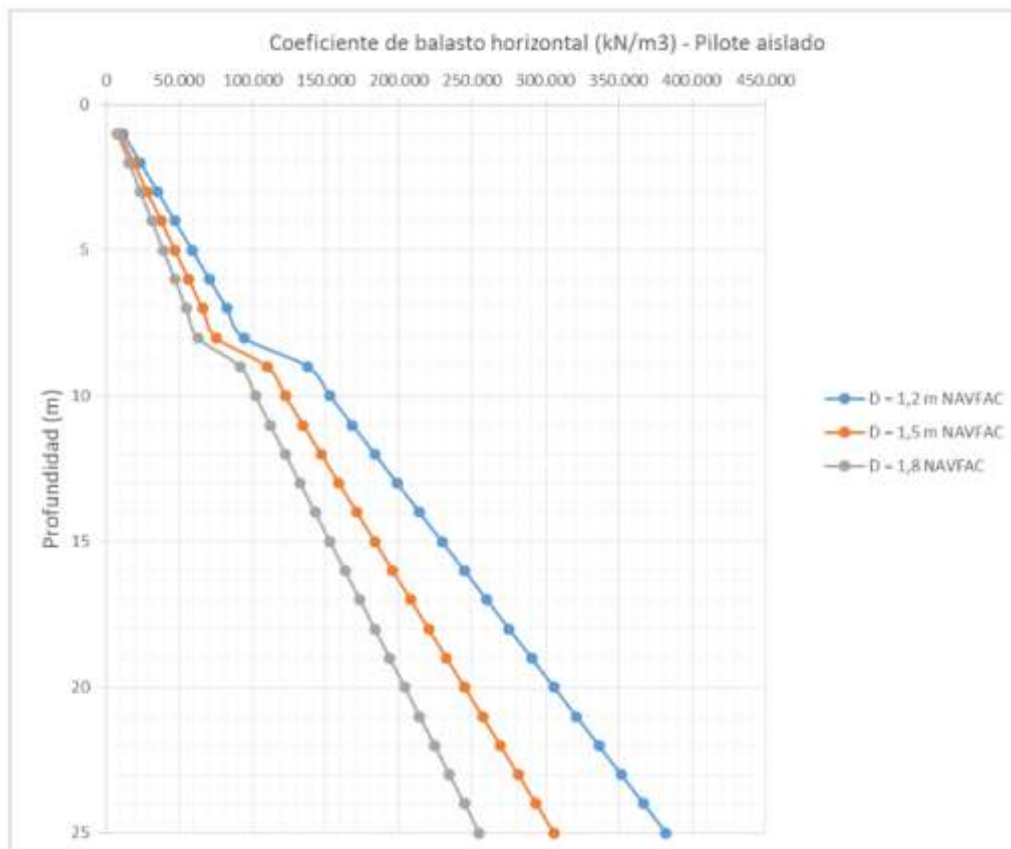


Nota: Relación entre  $f$  vs densidad relativa del suelo.

Considerando una densidad relativa del 75% para los depósitos eólicos y aluviales densos, y una densidad relativa del 90% para los depósitos aluviales muy densos del proyecto que subyacen debajo de los depósitos anteriormente mencionados, se obtienen los siguientes valores de coeficiente de balasto horizontal:

**Figura 42:**

*Coefficientes de balasto horizontal*



*Nota:* Gráfico de coeficiente de balasto de acuerdo al Proyecto “Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay” (2020).

#### 4.1.2 Metodología del estudio (esquema de secuencia de procedimientos)

El estudio realizado toma en cuenta la información brindada para el proyecto del Estudio de ingeniería definitiva para la construcción de los ejes viales de acceso al complejo de ingreso del terminal portuario de Chancay (2020). Esta información fue organizada y recopilada mediante guías de observación tanto geotécnicas como

estructurales. Posteriormente, se desarrolló el modelo estructural que considera el efecto de la interacción suelo-estructura y el modelo estructural sin considerar el efecto de la interacción suelo-estructura (con un apoyo empotrado), se realizó el análisis estructural, mediante análisis lineales para la obtención de las respuestas sísmicas del puente. Finalmente, se analiza los resultados de acuerdo a las variables de estudio y dimensiones para validar las hipótesis planteadas.

#### **4.1.3 Resultados en la respuesta sísmica de las subestructuras**

##### **4.1.3.1 Efectos de interacción Respuestas estructurales**

###### **4.1.3.1.1 Desplazamientos**

Del análisis modal espectral se obtuvieron los siguientes desplazamientos longitudinales y transversales, ver la siguiente tabla. Los desplazamientos se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 6:**

*Desplazamiento del análisis espectral (mm)*

Desplazamientos (mm)	Base empotrada	Base flexible
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 1 0.0mm	Pilar 1 144.26mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 1 0.0mm	Pilar 1 16.14mm
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 2 0.0mm	Pilar 2 0.05mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 2 0.0mm	Pilar 2 4.24mm
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 3 0.0mm	Pilar 3 124.06mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 3 0.0mm	Pilar 3 18.14mm
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 4 0.0mm	Pilar 4 0.05mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 4 0.0mm	Pilar 4 4.57mm
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 5 0.0mm	Pilar 5 165.2mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 5 0.0mm	Pilar 5 16.30mm

Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 6 0.0mm	Pilar 6 318.8mm
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 6 0.0mm	Pilar 6 17.40mm
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 7 0.0mm	Pilar 7 481.6m
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 7 0.0mm	Pilar 7 22.2mm

*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

#### 4.1.3.1.2 *Periodo fundamental*

Del análisis modal espectral se obtuvieron los siguientes periodos de vibración, ver la siguiente tabla. Los periodos de vibración se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 7:**

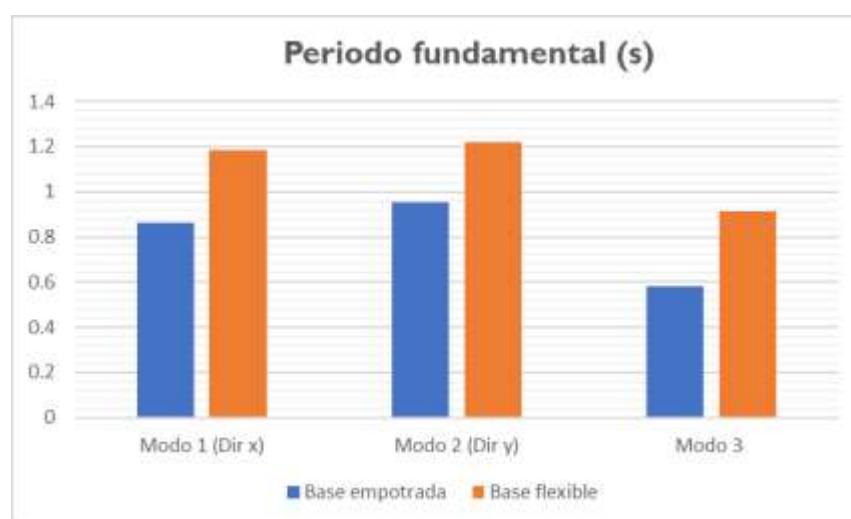
*Periodo fundamental(s)*

Periodo fundamental (s)	Base empotrada	Base flexible
Modo 1 (Dir x)	0.862	1.185
Modo 2 (Dir y)	0.955	1.221
Modo 3	0.583	0.911

*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

**Figura 43:**

*Gráfico de barras del periodo fundamental(s)*



*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

### 4.1.3.1.3 Fuerzas cortantes basales

Del análisis modal espectral se obtuvieron las siguientes fuerzas cortantes, ver la siguiente tabla. Las fuerzas cortantes basales se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 8:**

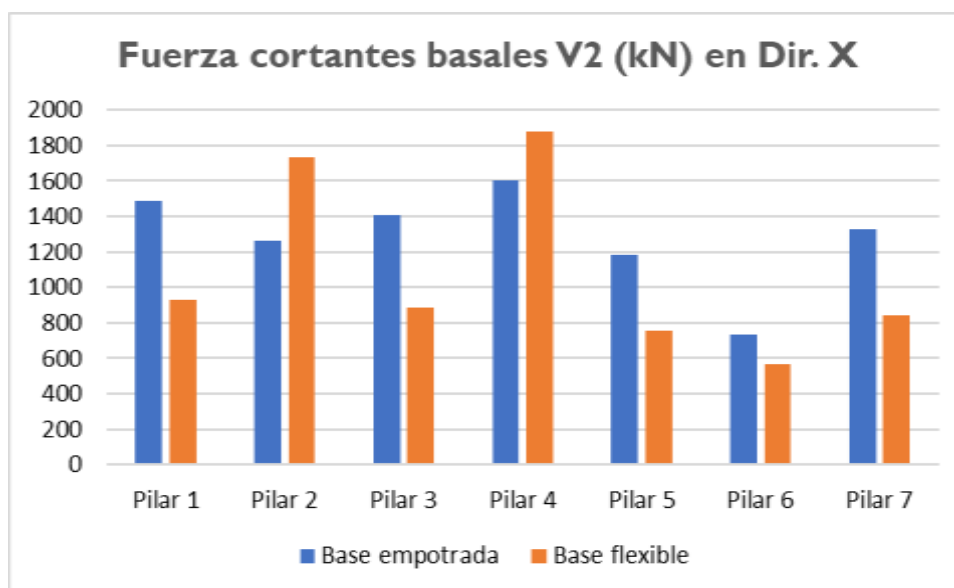
*Fuerzas cortantes basales (kN)*

Fuerzas cortantes en la base	Base empotrada V2 (KN)	Base flexible V2 (KN)	Base empotrada V3 (KN)	Base flexible V3 (KN)
Dirección X	Pilar 1 1488	Pilar 1 927.25	Pilar 1 2351	Pilar 1 1107.8
Dirección Y	Pilar 1 1382	Pilar 1 788.9	Pilar 1 2972	Pilar 1 1517
Dirección X	Pilar 2 1260	Pilar 2 1733	Pilar 2 947	Pilar 2 1088
Dirección Y	Pilar 2 1552	Pilar 2 1481	Pilar 2 967	Pilar 2 1242.5
Dirección X	Pilar 3 1411	Pilar 3 887	Pilar 3 1274	Pilar 3 1018.3
Dirección Y	Pilar 3 1239	Pilar 3 777.50	Pilar 3 2121	Pilar 3 1549.1
Dirección X	Pilar 4 1602	Pilar 4 1877	Pilar 4 716	Pilar 4 883
Dirección Y	Pilar 4 1634	Pilar 4 1537	Pilar 4 1034	Pilar 4 1121
Dirección X	Pilar 5 1186	Pilar 5 754	Pilar 5 1958	Pilar 5 1688
Dirección Y	Pilar 5 2108	Pilar 5 1701	Pilar 5 1018	Pilar 5 792
Dirección X	Pilar 6 734	Pilar 6 566	Pilar 6 1970	Pilar 6 1666
Dirección Y	Pilar 6 1376	Pilar 6 1360	Pilar 6 1114	Pilar 6 684
Dirección X	Pilar 7 1330	Pilar 7 844	Pilar 7 5592	Pilar 7 2416
Dirección Y	Pilar 7 2648	Pilar 7 2040	Pilar 7 3194	Pilar 7 1006

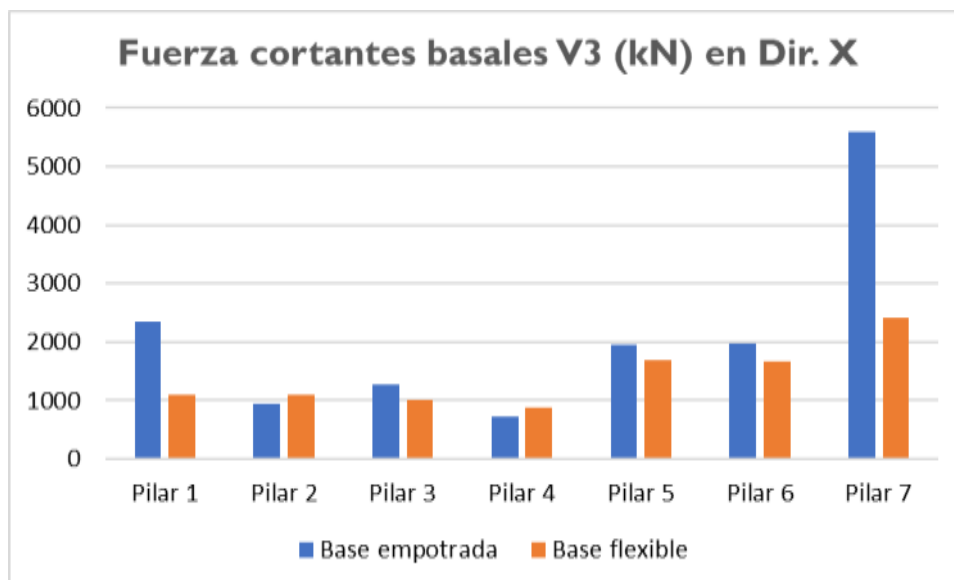
*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

**Figura 44:**

*Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V2 (kN) en Dir. X*

**Figura 45:**

*Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V3 (kN) en Dir. X*



**Figura 46:**

Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V2 (kN) en Dir. Y

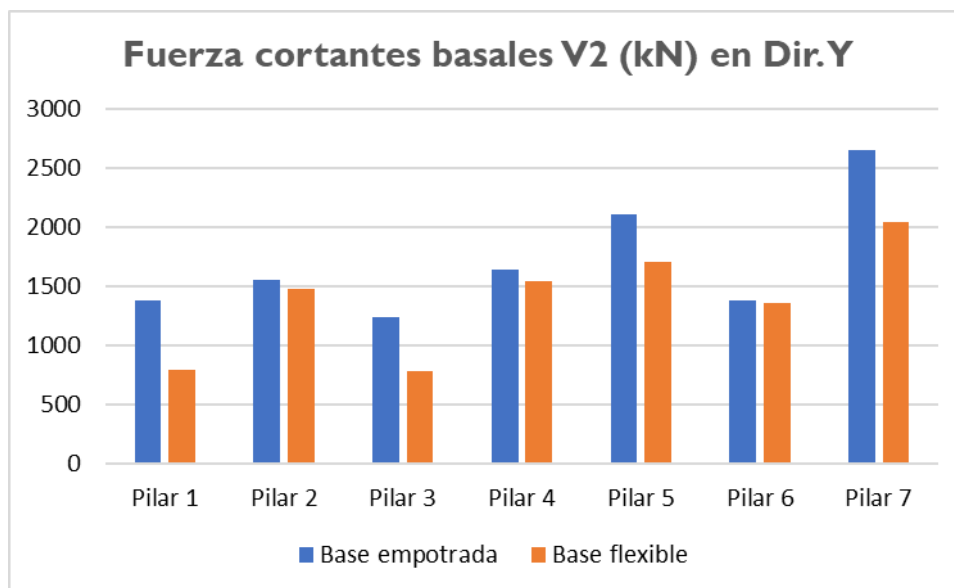
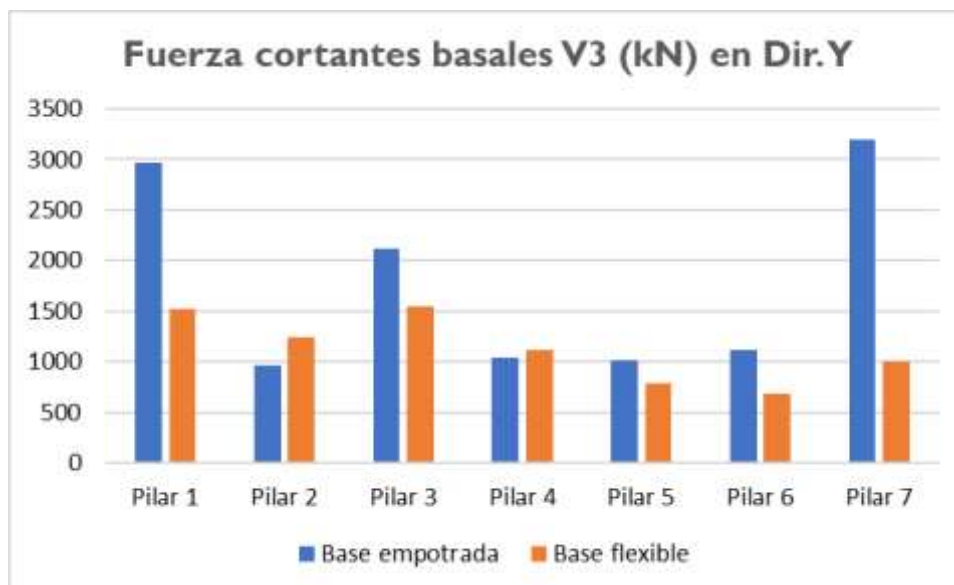
**Figura 47:**

Gráfico de barras de fuerzas cortantes basales V3 (kN) en Dir. Y



#### 4.1.3.1.4 Momentos flectores basales

Del análisis modal espectral se obtuvieron los siguientes momentos flectores en la base del pilar, ver la siguiente tabla. Los momentos flectores basales se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 9:**

*Momentos flectores basales (kN\*m)*

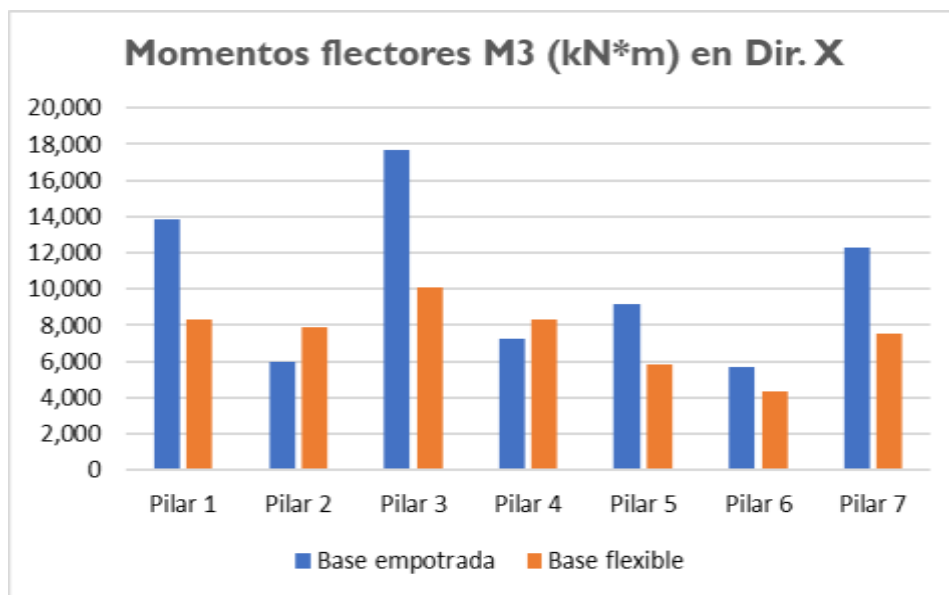
Momentos flectores en la base	Base empotrada M3 (KN*m)	Base flexible M3 (KN*m)	Base empotrada M2 (KN*m)	Base flexible M2 (KN*m)
Dirección X	Pilar 1 13,876	Pilar 1 8277	Pilar 1 21730	Pilar 1 9966
Dirección Y	Pilar 1 12823	Pilar 1 7078	Pilar 1 27555	Pilar 1 13770
Dirección X	Pilar 2 5934	Pilar 2 7850	Pilar 2 7178	Pilar 2 8391
Dirección Y	Pilar 2 6944	Pilar 2 6745	Pilar 2 7356	Pilar 2 9596
Dirección X	Pilar 3 17685	Pilar 3 10079	Pilar 3 14118	Pilar 3 10668
Dirección Y	Pilar 3 14100	Pilar 3 5839	Pilar 3 23670	Pilar 3 16524
Dirección X	Pilar 4 7269	Pilar 4 8318	Pilar 4 5717	Pilar 4 7168
Dirección Y	Pilar 4 7168	Pilar 4 6603	Pilar 4 8291	Pilar 4 9118
Dirección X	Pilar 5 9166	Pilar 5 5790	Pilar 5 14859	Pilar 5 12786
Dirección Y	Pilar 5 16312	Pilar 5 13064	Pilar 5 8247	Pilar 5 6022
Dirección X	Pilar 6 5650	Pilar 6 4320	Pilar 6 14956	Pilar 6 12664
Dirección Y	Pilar 6 10606	Pilar 6 10801	Pilar 6 8468	Pilar 6 5194
Dirección X	Pilar 7 12280	Pilar 7 7504	Pilar 7 51770	Pilar 7 21600
Dirección Y	Pilar 7 24314	Pilar 7 18168	Pilar 7 29612	Pilar 7 9426

*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

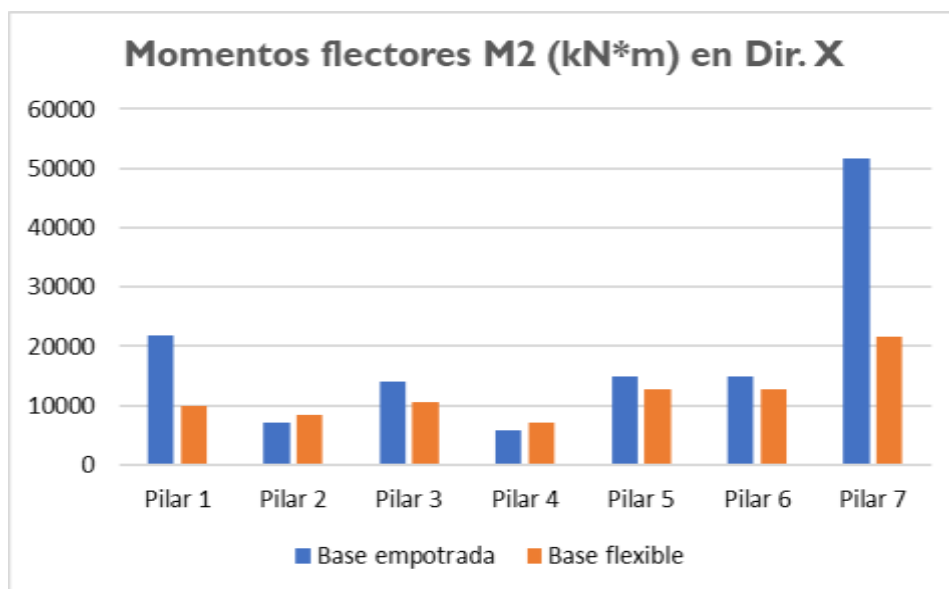


**Figura 48:**

*Gráfico de barras de Momentos flectores M3 (kN\*m) en Dir. X*

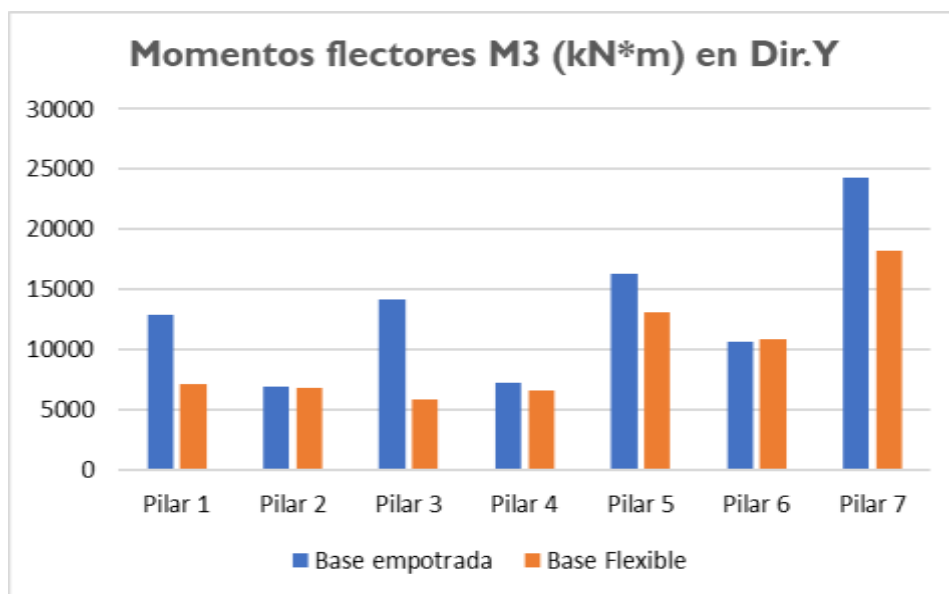
**Figura 49:**

*Gráfico de barras de Momentos flectores M2 (kN\*m) en Dir. X*

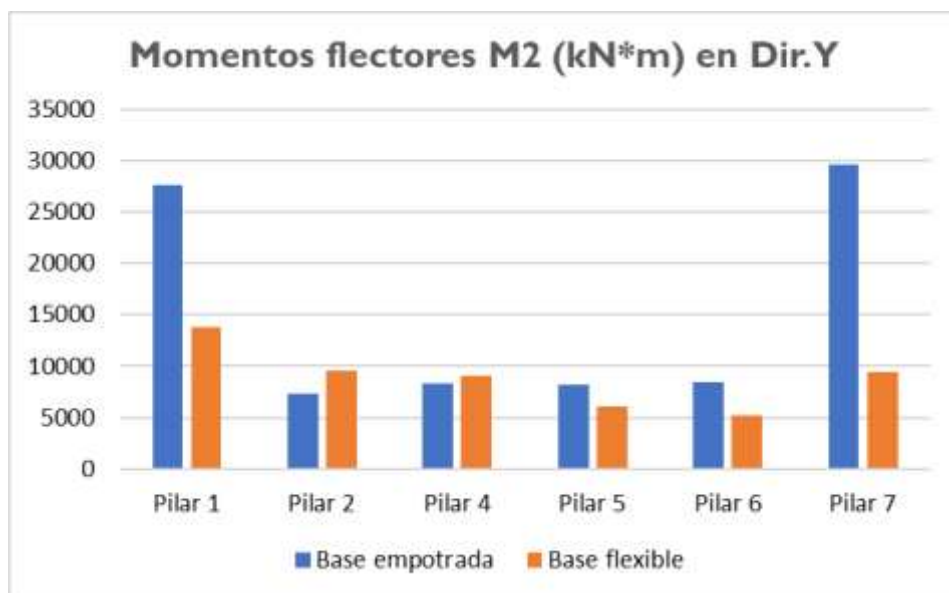


**Figura 50:**

*Gráfico de barras de Momentos flectores M3 (kN\*m) en Dir. Y*

**Figura 51:**

*Gráfico de barras de Momentos flectores M2 (kN\*m) en Dir. Y*



### 4.1.3.2 Efectos en la respuesta del aislador sísmica

#### 4.1.3.2.1 Desplazamiento relativo del aislador

Del análisis modal espectral se obtuvieron los siguientes desplazamientos relativos del aislador en cada pilar, ver la siguiente tabla. Los desplazamientos relativos del aislador se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 10:**

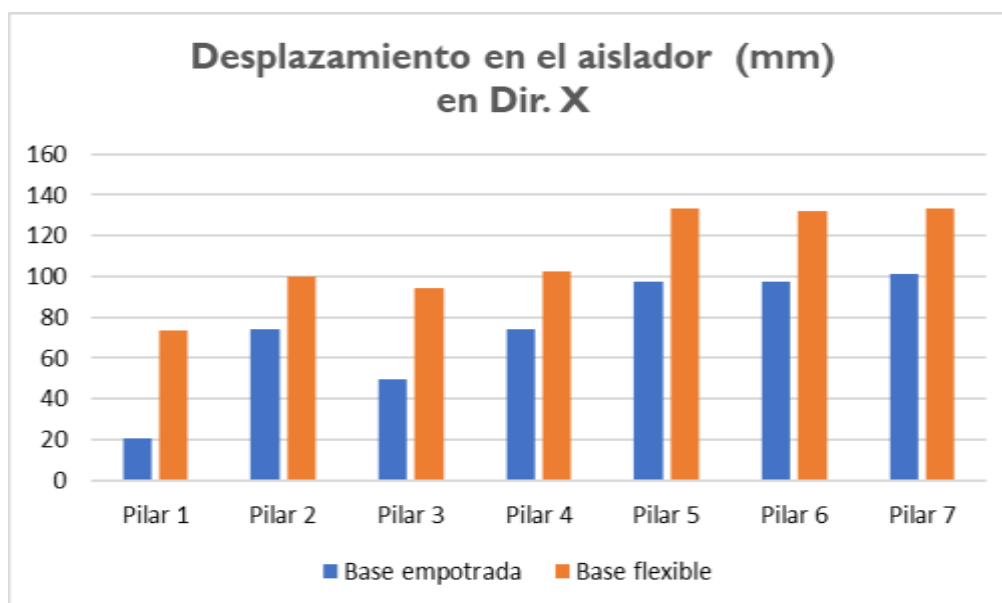
*Desplazamiento relativo del aislador(mm)*

Desplazamientos (mm)	Base empotrada	Base flexible
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 1 20.6	Pilar 1 73.6
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 1 84.9	Pilar 1 144.0
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 2 73.90	Pilar 2 99.9
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 2 103.10	Pilar 2 129.22
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 3 49.2	Pilar 3 94.1
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 3 125.2	Pilar 3 140.2
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 4 74.4	Pilar 4 102.5
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 4 128.8	Pilar 4 137.3
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 5 97.38	Pilar 5 133.5
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 5 106.81	Pilar 5 139.0
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 6 97.47	Pilar 6 132.1
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 6 106.81	Pilar 6 127.8
Longitudinales de la estructura por sismo	Pilar 7 101.00	Pilar 7 133.5
Transversales de la estructura por sismo	Pilar 7 21.3	Pilar 7 103.3

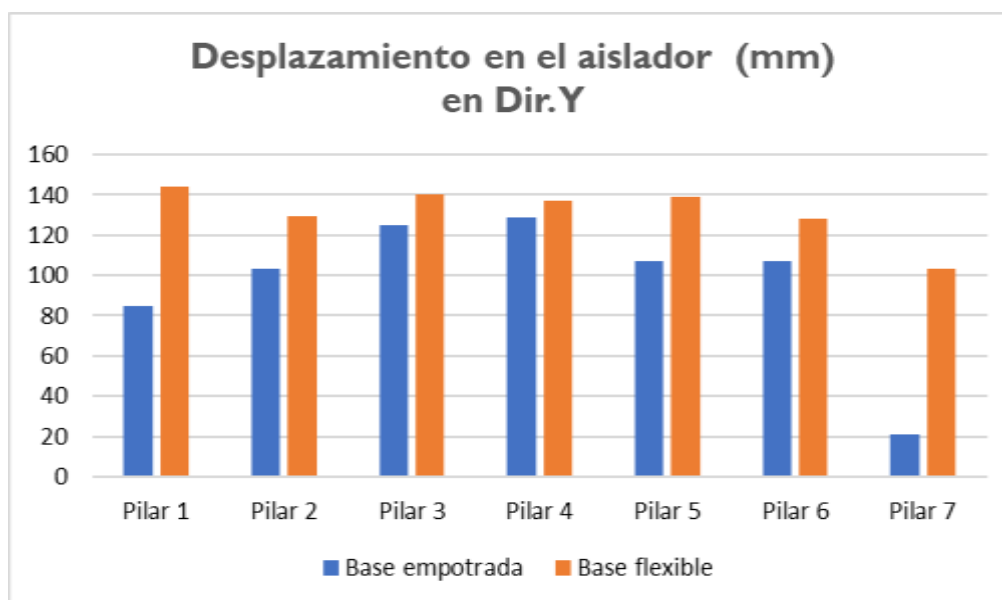
*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

**Figura 52:**

*Gráfico de barras desplazamiento en el aislador (mm) en Dir. X*

**Figura 53:**

*Gráfico de barras desplazamiento en el aislador (mm) en Dir. Y*



#### 4.1.3.2.2 Fuerzas sísmicas del aislador

Del análisis modal espectral se obtuvieron las siguientes fuerzas sísmicas del aislador, ver la siguiente tabla. Las fuerzas sísmicas del aislador se analizan para el modelo con base empotrada y base flexible.

**Tabla 11:**

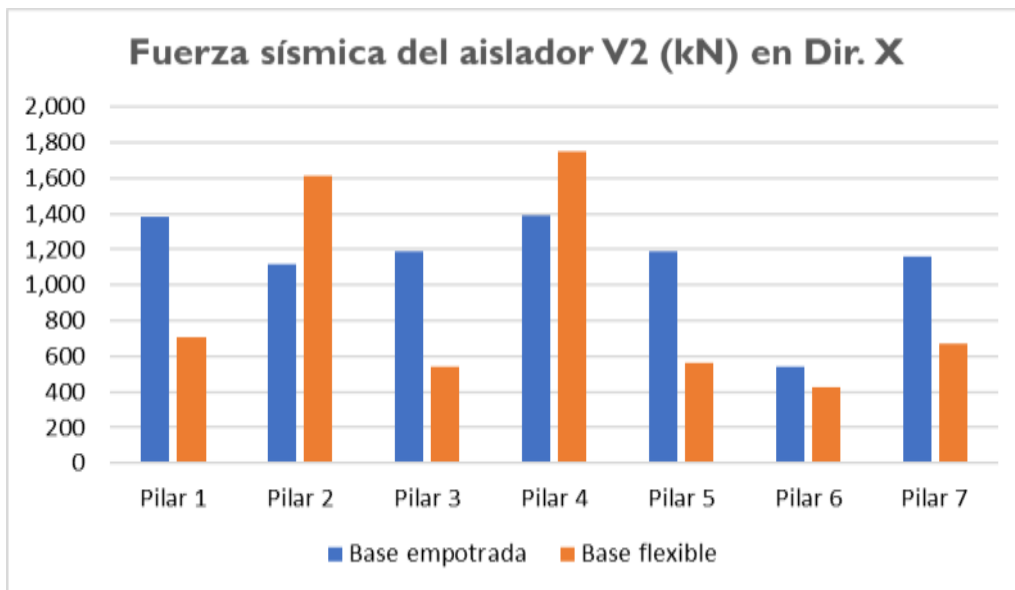
*Fuerzas sísmicas del aislador(kN)*

Fuerzas cortantes en la base	Base empotrada V2 (KN)	Base flexible V2 (KN)	Base empotrada V3 (KN)	Base flexible V3 (KN)
Dirección X	Pilar 1 1382.5	Pilar 1 708.5	Pilar 1 2082.8	Pilar 1 876
Dirección Y	Pilar 1 1243.2	Pilar 1 623	Pilar 1 2682	Pilar 1 1256
Dirección X	Pilar 2 1118.0	Pilar 2 1611	Pilar 2 705.9	Pilar 2 923
Dirección Y	Pilar 2 1410	Pilar 2 1430	Pilar 2 439.5	Pilar 2 1065
Dirección X	Pilar 3 1191.2	Pilar 3 544	Pilar 3 1015.9	Pilar 3 951.2
Dirección Y	Pilar 3 1039.5	Pilar 3 582	Pilar 3 1726.2	Pilar 3 1581
Dirección X	Pilar 4 1393.1	Pilar 4 1746	Pilar 4 516.1	Pilar 4 728
Dirección Y	Pilar 4 1461.7	Pilar 4 1416	Pilar 4 765.5	Pilar 4 934
Dirección X	Pilar 5 1186.2	Pilar 5 562	Pilar 5 1460.1	Pilar 5 1303
Dirección Y	Pilar 5 1638.4	Pilar 5 1314	Pilar 5 819.4	Pilar 5 587
Dirección X	Pilar 6 542.3	Pilar 6 426	Pilar 6 1467.2	Pilar 6 1296
Dirección Y	Pilar 6 1039.2	Pilar 6 1064	Pilar 6 811.1	Pilar 6 538
Dirección X	Pilar 7 1159.2	Pilar 7 669	Pilar 7 5026.1	Pilar 7 1907
Dirección Y	Pilar 7 2211	Pilar 7 1640	Pilar 7 2763.5	Pilar 7 829

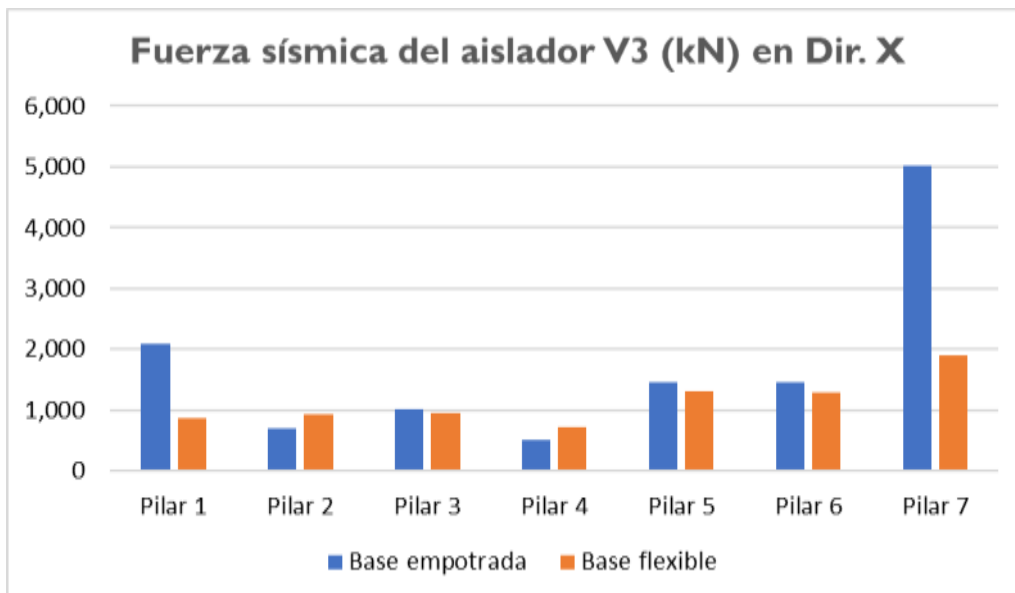
*Nota:* Valores obtenidos a partir de los modelos de base empotrada y flexible

**Figura 54:**

*Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V2 (kN) en Dir. X*

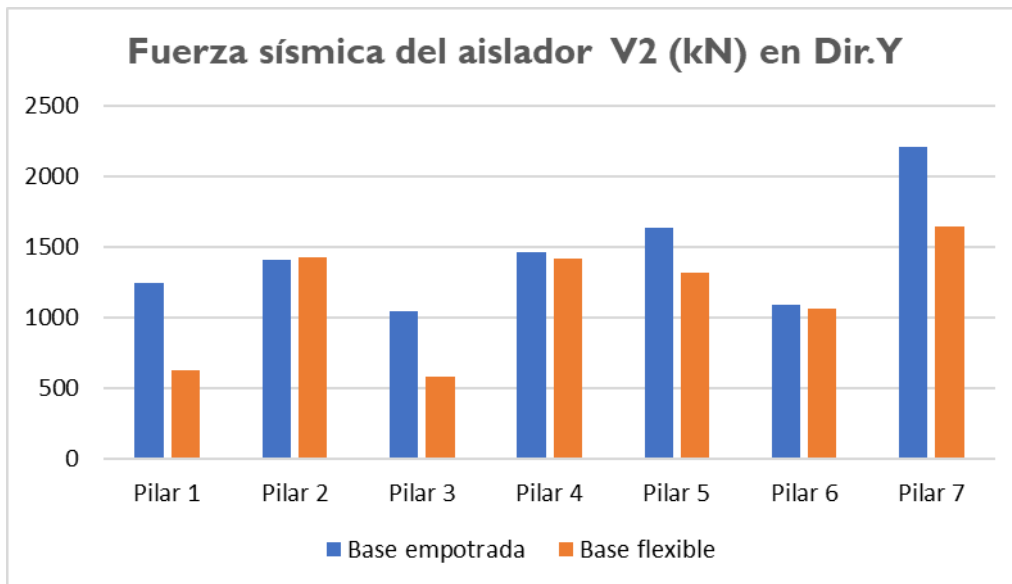
**Figura 55:**

*Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V3 (kN) en Dir. X*

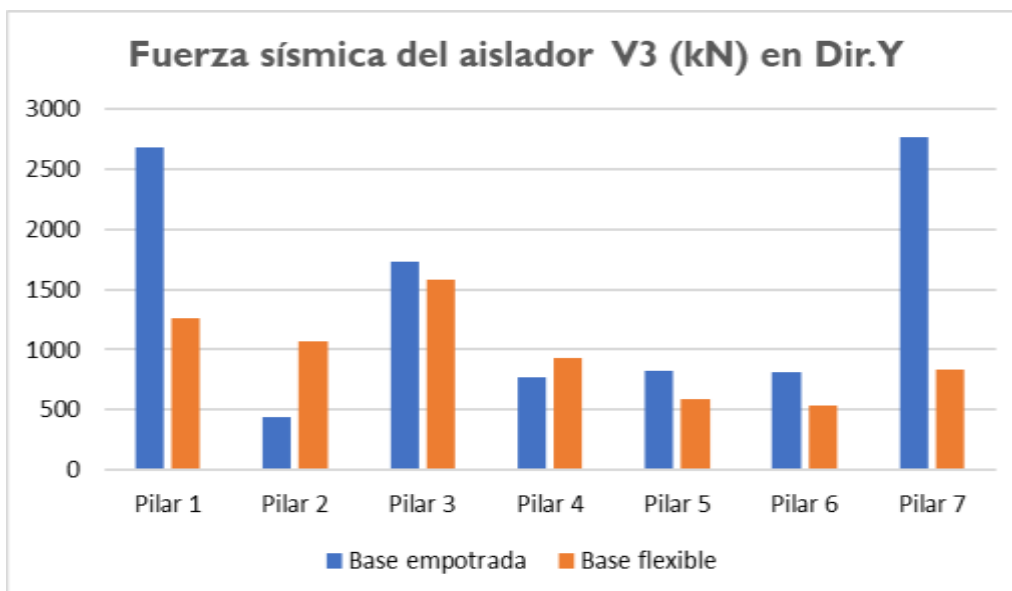


**Figura 56:**

*Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V2 (kN) en Dir. Y*

**Figura 57:**

*Gráfico de barras de fuerzas sísmicas del aislador V3 (kN) en Dir. Y*



## **4.2 Discusión de Resultados**

En este capítulo se compara la investigación realizada con otras investigaciones relacionadas al tema, a través del análisis de los resultados obtenidos de los modelos estructurales presentados en el capítulo anterior (4.1).

### ***4.2.1 Efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura aislados sísmicamente.***

A partir de los resultados obtenidos, aceptamos la hipótesis general que establece que existe relación de dependencia entre la interacción suelo estructura y respuesta sísmica de la subestructura con aisladores en el puente Terminal Portuario de Chancay.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen M.Diclesi, M.ASCE; S.Albhaisi; MI Mansour, AMASCE (2005); Alper Ucak; Panos Tsopelas; AMASCE (2008); Marin(2019) , quienes manifiestan que la interacción suelo estructura influye en los resultados de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores. Ello es acorde con lo obtenido en este estudio.

Pero, en lo que no concuerdan estos autores con el presente estudio, es que ellos mencionan que la interacción suelo tiene mayor influente en la respuesta sísmica de la subestructura en casos donde el suelo es más blando. En este estudio no se encuentra esos resultados.

### ***4.2.2 Efectos del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente***

En lo que respecta a la relación entre el modelo con suelo de rigidez infinita y la dimensión respuesta sísmica del aislador del puente los resultados guardan relación con M.Diclesi, M.ASCE; S.Albhaisi; MI Mansour, AMASCE (2005); Alper Ucak; Panos Tsopelas; AMASCE (2008) en que el modelo de suelo de rigidez infinita influye en la



obtención de las respuestas sísmica del aislador en puentes flexibles con características de superestructura pesada y subestructura liviana.

Pero, en lo que no concuerdan estos autores con el presente estudio, es que ellos mencionan que el modelo de suelo de rigidez infinita tiene influencia en la respuesta sísmica del aislador en casos de puentes rígidos con características de superestructura liviana y subestructura pesada. En este estudio no se encuentran esos resultados.

#### ***4.2.3 Efectos del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura del puente***

En lo que respecta a la relación entre el modelo con suelo flexible y la dimensión de las respuestas estructurales en la subestructura del puente los resultados guardan relación con M. Diclesi, M. ASCE; S. Albhaisi; M. I. Mansour, AMASCE (2005); Alper Ucak; Panos Tsopelas; AMASCE (2008) en que el modelo de suelo flexible influye en las respuestas estructurales de la subestructura de puentes flexibles con características de superestructura pesada y subestructura liviana.

Pero, en lo que no concuerdan estos autores con el presente estudio, es que ellos mencionan que el modelo de suelo flexible influye en las respuestas estructurales de la subestructura de puentes rígidos con características de superestructura liviana y subestructura pesada. En este estudio no se encuentran esos resultados.

#### ***4.2.4 Efectos del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente***

En lo que respecta a la relación entre el modelo con suelo flexible y la dimensión de la respuesta sísmica del aislador del puente los resultados guardan relación con M. Diclesi, M. ASCE; S. Albhaisi; M. I. Mansour, AMASCE (2005); Alper Ucak; Panos Tsopelas; AMASCE (2008) en que el modelo de suelo flexible influye en la obtención de las

respuestas sísmicas del aislador en puentes flexibles con características de superestructura pesada y subestructura liviana.

Pero, en lo que no concuerdan estos autores con el presente estudio, es que ellos mencionan que el modelo de suelo flexible tiene influencia en la respuesta sísmica del aislador en casos de puentes rígidos con características de superestructura liviana y subestructura pesada. En este estudio no se encuentra esos resultados.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

-El modelo con suelo de rigidez infinita reduce el desplazamiento en la base en un 100% como respuesta estructural del puente Terminal Portuario de Chancay en la dirección “X” e “Y”.

-El modelo con suelo de rigidez infinita reduce el periodo fundamental en un 37% como respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay en la dirección “X”; mientras que en la dirección “Y” se reduce en un 27%.

-El modelo con suelo flexible reduce en promedio el 20% las fuerzas basales y los momentos basales como respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay en la dirección “X”; mientras que en la dirección “Y” se tiene una reducción en promedio del 25% en las fuerzas basales y los momentos basales.

-El modelo con suelo flexible aumenta en promedio un 35% los desplazamientos y reduce 25% las fuerzas sísmicas de los aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay en la dirección “X”; mientras que en la dirección “Y” se tiene un aumento en promedio de 30% y reducción de 30% para desplazamientos y fuerzas sísmicas respectivamente.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda futuras líneas de investigación que incluyan otros modelos constitutivos de suelos tales como curvas p-y, y modelos de elementos finitos.

Se recomienda realizar una variación de la tipología y geometría del puente, para analizar el impacto que tiene la interacción suelo estructura en los diversos tipos de puentes tales como: puentes atirantados, puentes en arco, puente colgante.

Se recomienda realizar la comparación de las metodologías propuestas por Normas internacionales (Método de FEMA 440, Método del ASCE) para el análisis de la interacción suelo estructura; a fin de establecer propuestas y criterios en las normas peruana como Manual de Puentes y Reglamento Nacional de Edificaciones.

Se recomienda una investigación que compare prototipo de puente con cimentación profunda a escala y un modelo integral del puente y suelo en 3D, mediante el método de elementos finito, con el objetivo de calibrar los valores obtenidos en los modelos computacionales.

## 6. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (2014). *Guide specifications for seismic isolation design*.
- AASHTO. (2011). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*.
- Bustamante Nuñez, A. (2019). *Propuesta de aisladores sísmicos para la disipación de energía en el desempeño estructural por desplazamiento en edificaciones-Unach-Chota*.
- Chen, W. F., & Duan, L. (2003). *Bridge engineering: seismic design*. CRC press.
- Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). *Bridge engineering handbook: Fundamentals*. CRC press.
- Das, B., (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
- Dicleli, M., Albhaisi, S., & Mansour, M. Y. (2005). *Static soil–structure interaction effects in seismic-isolated bridges*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 10(1), 22-33.
- El Peruano (2019). *Decreto Supremo que aprueba la Norma Técnica E.031 “Aislamiento Sísmico” y la incorpora al Índice del Reglamento Nacional de Edificaciones*. Recuperado el 12 de octubre del 2021 de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-la-norma-tecnica-e031-aislamie-decreto-supremo-n-030-2019-vivienda-1823291-2/>
- Felippa, C. A. (2004). *Introduction to finite element methods*. University of Colorado, 885.
- Gestión (2021). *Sismo: Mapa con las zonas de más alto riesgo en Lima*. Recuperado el 10 de octubre del 2021 de <https://gestion.pe/peru/sismo-mapa-zonas-alto-riesgo-lima-268164-noticia/>

- Lopez, E. (2012). *Análisis de interacción sísmica suelo estructura para reducir esfuerzos en los elementos estructurales en edificaciones regulares e irregulares con zapatas aisladas en Huaraz*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Makris, N. (2018). *Seismic isolation: Early history*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. doi:10.1002/eqe.3124
- Manterola J. (2006). *Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Marín Guillén, F. (2019). *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*. Tesis de maestría.
- Martínez de la Concha, A. (2017). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento dinámico de puentes sometidos al paso de trenes de alta velocidad*.
- Michan Pajares, M. A. (2016). *Comparación de la respuesta sísmica de puente vigalosa, con y sin aisladores sísmicos*. Cajamarca. Tesis para obtener el grado de maestro con mención en estructuras. Obtenido de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1297>.
- Moscoso Tinco, J. (2019). *Evaluación del desempeño de edificaciones hospitalarias prefabricadas con aislamiento sísmico en el Perú*.
- Pajares, M., (2016). *Comparación de la respuesta sísmica de puentes viga-losa, con y sin aisladores sísmicos, en Cajamarca*.
- Silva, P. F., & Manzari, M. T. (2008). *Soil-structure interaction analysis of bridge columns supported on CISS piles*. In Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV (pp. 1-11).

Tongaonkar, N. P., & Jangid, R. S. (2003). *Seismic response of isolated bridges with soil–structure interaction*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(4), 287–302. doi:10.1016/s0267-7261(03)00020-4

Ucak, A., & Tsopelas, P. (2008). *Effect of soil–structure interaction on seismic isolated bridges*. *Journal of structural engineering*, 134(7), 1154-1164.

## **7. Anexos**



## Anexo A

## FORMATO 4.3: Declaración de autenticidad y no plagio



Universidad  
Ricardo Palma

Escuela de Posgrado

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y NO PLAGIO

### DECLARACIÓN DEL GRADUANDO

Por el presente, el graduando: (Apellidos y nombres)

**Cutti Huamani, Jean Marcos**

en condición de egresado del Programa de Posgrado:

**MAESTRÍA EN INGENIERIA VIAL CON MENCIÓN EN CARRETERAS, Puentes y Túneles.**

deja constancia que ha elaborado la tesis intitulada:


**Influencia de la Interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores en el puente Terminal Portuario de Chancay**

Declara que el presente trabajo de tesis ha sido elaborado por el mismo y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica, de investigación, profesional o similar.

Deja constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no ha asumido como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de la Internet.

Asimismo, ratifica que es plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asume la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y es consciente de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, el graduando se somete a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y los dispositivos legales vigentes.

  
Firma del graduando

**05/10/2021**

Fecha

**Anexo B****DECLARACIÓN DE ACCESO A LA INFORMACIÓN****Por el presente motivo:**

Yo, Jean Marcos Cutti Huamani con DNI 47525411, egresado del programa de posgrado Maestría en Ingeniería Vial con mención en carreteras, puentes y túneles de la Universidad Ricardo Palma, doy fe que tengo acceso a la información requerida para el desarrollo de la tesis titulada: **Influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores en el puente Terminal Portuario de Chancay.**

Lima, 05 de octubre del 2021.



---

Jean Marcos Cutti Huamani  
DNI:47525411

## Anexo C

### Matriz de consistencia interna de la investigación

**Influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores en el puente Terminal Portuario de Chancay.**

<b>Problema principal</b>	<b>Objetivos generales</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>Variables independientes</b>	<b>Metodología</b>
¿En qué medida la interacción suelo-estructura afecta la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?	Determinar la influencia de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	La interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con aisladores del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	Interacción suelo-estructura.  <b>Dimensiones:</b> Modelo con suelo de rigidez infinita  Modelo con suelo flexible	<b>Método de la investigación</b> Analítico  <b>Enfoque</b> Cuantitativo  <b>Tipo</b> Aplicada  <b>Recolección de datos</b> Retrospectiva
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Variables dependientes</b>	<b>Nivel de Investigación</b>
¿En qué medida el modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?	Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	El modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	Respuestas sísmicas de la subestructura con aisladores	<b>Diseño de investigación</b> Descriptivo

¿En qué medida el modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?	Determinar la influencia del modelo con suelo de rigidez infinita para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	El modelo con suelo de rigidez infinita afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	<b>Dimensiones:</b>  Respuestas estructurales  Respuestas sísmicas del aislador	No experimental Transversal Prospectivo
¿En qué medida el modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?	Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	El modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas estructurales del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.		.
¿En qué medida el modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico?	Determinar la influencia del modelo con suelo flexible para la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.	El modelo con suelo flexible afecta en la obtención de las respuestas sísmicas del aislador del puente Terminal Portuario de Chancay a través del modelamiento numérico.		

## Anexo C-2

## Matriz de operacionalización

<b>Variables Independientes</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Interacción suelo-estructura</b>	La interacción suelo estructura tiene como principal fin, permitir la participación del suelo dentro del análisis estructural. Esto se puede realizar gracias a la consideración de que el suelo se comporta similar a un resorte vertical en un modelo simple, o la consideración de más resortes para modelar un comportamiento completo. (López, 2012)	Parametrización matemática que permite representar al suelo como un elemento que aporta rigidez a la estructura, conllevando un cambio de respuestas estructurales en todos los elementos presentes.	Modelo con suelo de rigidez infinita  Modelo con suelo flexible.	Rigideces traslacionales infinita. Rigideces rotacionales infinita.  Propiedades constitutivas. Rigideces de suelo	Fichas descriptivas de datos  Guía de observación  Programas de software computacional: Mathcad v15
<b>Variable dependiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Respuesta sísmica de la subestructura de un puente con aisladores</b>	Es aquella respuesta relacionada a la fuerza sísmica, esta depende de la aceleración del suelo. Además, se puede observar mediante desplazamientos, velocidades y aceleraciones. (Minchán, 2016)	Respuestas de acuerdo al sismo de diseño presentado en el proyecto, estas respuestas están presentes en deformaciones, fuerzas y propiedades fundamentales de la estructura.	Respuestas estructurales  Respuestas sísmicas del aislador.	Desplazamientos Fuerza basal Periodo fundamental  Desplazamiento relativo del aislador Fuerzas sísmicas del aislador	Guía de observación  Programas de software computacional: C.S.I Bridge v22 Mathcad v15

## Anexo D

### INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

#### FICHA DE RECOPIACIÓN DE DATOS PARA PARÁMETROS

**Objetivo:** Identificar y medir los parámetros iniciales para determinar los efectos de la interacción suelo-estructura.

#### **PARÁMETROS DEL PUENTE**

##### **I.- IDENTIFICACION Y UBICACION**

Nombre  
Departamento Vial  
Provincia  
Distrito

##### **II.- DATOS GENERALES**

Puente sobre  
Nombre  
Longitud total  
Ancho calzada  
Ancho vereda  
Altura libre superior  
Altura libre inferior  
Núm. vías de transito  
Sobrecarga diseño  
Alineamiento

##### **III.- TRAMOS**

Número de tramo	
Tramos	
Longitud Total	
Longitud 1º Tramo	Luz Principal
Longitud 2º Tramo	Luz Principal
Longitud 3º Tramo	Luz Principal

##### **III.A.- TRAMO 1**

Categoría / Tipo  
Características  
Secundarias  
Condición de borde  
  
Material predominante

##### **III.B.- TRAMO 2**

Categoría / Tipo  
Características  
Secundarias  
Condición de  
borde  
Material  
predominante

##### **III.C.- TRAMO 3**

Categoría / Tipo  
Características  
Secundarias  
Condición de borde

Material predominante

**IV.- SUBESTRUCTURA*****IV.A- ESTRIBO IZQUIERDO*****ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

***IV.B- ESTRIBO DERECHO*****ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

**V.- PILARES*****V.A- PILAR 1*****ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

***V.B- PILAR 2*****ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

**VI.- APOYOS*****APOYO 1***

Tipo

Material

Ubicación

Número

***APOYO 2***

Tipo

Material

Ubicación

Número

***APOYO 3***

Tipo

Material

Ubicación

Número

***APOYO 4***

Tipo

Material

Ubicación

Número

<b>I- PARÁMETROS DEL SUELO</b>	
<b><i>I.A- ESTRATO 1</i></b>	<b><i>I.C- ESTRATO 3</i></b>
Tipo de Suelo	Tipo de Suelo
Profundidad estrato	Profundidad estrato
Ángulo de fricción interna	Ángulo de fricción interna
Cohesión	Cohesión
Peso específico	Peso específico
Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Poisson
<hr/>	
<b><i>I.B- ESTRATO 2</i></b>	
Tipo de Suelo	
Profundidad estrato	
Ángulo de fricción interna	
Cohesión	
Peso específico	
Coefficiente de Poisson	
<hr/>	
<b>II- CAMPANA GEOTÉCNICA UBICACION</b>	
<b><i>II.A ESTRIBO 1</i></b>	<b><i>II.B PILA 1</i></b>
Investigación	Investigación
Investigaciones realizadas	Investigaciones realizadas
Licuefacción	Licuefacción
Espesor licuable a partir de terreno natural	Espesor licuable a partir de terreno natural
<b><i>II.C PILA 2</i></b>	<b><i>II.D ESTRIBO 2</i></b>
Investigación	Investigación
Investigaciones realizadas	Investigaciones realizadas
Licuefacción	Licuefacción
Espesor licuable a partir de terreno natural	Espesor licuable a partir de terreno natural
<hr/>	
<b>III. CAMPAÑA GEOTÉCNICA ANDES 2016 (INVESTIGACIONES DE CAMPO Y DE LABORATORIO)</b>	
Sondaje SPT	Ensayo de compresión triaxial
Análisis granulométrico por tamizado	Ensayo de corte directo
Límites de Atterberg	Perfil MASW
Gravedad Específica de sólidos	Perfil MAM



Densidad mínima,  
máxima y relativa

---

**IV.- PARÁMETROS ELÁSTICOS EN APOYO (PILA 1, PILA 2 Y ESTRIBO 2)**

***IV.A- 2 a 5 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación  
Dinámico

***IV.B- 5 a 13 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación  
Dinámico

***IV.C- 13 a 20 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

***IV.D- 20 a 30 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

**V.- PARÁMETROS ELÁSTICOS EN APOYO (ESTRIBO 1)**

***V.A- 2 a 4 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación  
Dinámico

***V.C- 11 a 19 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

***V.B- 4 a 11 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación  
Dinámico

***V.D- 19 a 30 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

## Anexo E

## INSTRUMENTOS DE RESULTADOS

## GUÍA DE OBSERVACIÓN DE RESULTADOS GEOTÉCNICOS

**Objetivo:** Medir los resultados obtenidos de los parámetros geotécnicos para el modelamiento de los pilotes de concreto armado.

Dimensiones	Indicadores	Items
		Cimentación flexible
Modelo con suelo flexible	<b>Propiedades constitutivas</b>	
	Rigidez traslacional en dirección "x"	
	Rigidez traslacional en dirección "y"	

## GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE RESPUESTAS SÍSMICAS CON AISLADORES

**Objetivo:** Medir los resultados obtenidos en las respuestas sísmicas de la subestructura con aisladores.

Dimensiones	Indicadores	Items	
		Base empotrada con aisladores	Suelo flexible con aisladores
Respuestas estructurales	Desplazamiento transversal de la estructura por sismo		
	Desplazamiento longitudinal de la estructura por sismo		
	Periodo fundamental		
	Fuerza basal transversal por sismo		
	Fuerza basal longitudinal por sismo		
Desempeño estructural	Desplazamiento relativo transversal del aislador		
	Desplazamiento relativo longitudinal del aislador		
	Fuerzas sísmicas transversal del aislador		
	Fuerzas sísmicas longitudinal del aislador		
	Desplazamiento objetivo longitudinal		

## Anexo F

## TABLAS DE CONFIABILIDAD Y VALIDEZ

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		Pertinencia	Relevancia	Construcción gramatical	Observaciones	Sugerencias
		Construcción	flexible					
Modelo con suelo flexible	Rigidez traslacional en dirección "x"			5	5	5		
	Rigidez traslacional en dirección "y"			5	5	5		

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo


Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		Pertinencia	Relevancia	Construcción gramatical	Observaciones	Sugerencias
		Base empotrada con aisladores	Suelo flexible con aisladores					
Respuestas estructurales	Desplazamiento transversal de la estructura por sismo			1-5	1-5	1-5		
	Desplazamiento longitudinal de la estructura por sismo			5	5	5		
	Periodo fundamental			5	5	5		
	Fuerza basal transversal por sismo			5	5	5		
	Fuerza basal longitudinal por sismo			5	5	5		
	Desplazamiento relativo transversal del aislador			5	5	5		
Respuestas sísmicas del aislador	Desplazamiento relativo longitudinal del aislador			5	5	5		
	Fuerzas sísmicas transversal del aislador			5	5	5		
	Fuerzas sísmicas longitudinal del aislador			5	5	5		
	Desplazamiento objetivo longitudinal			5	5	5		

**OPINIÓN DE APLICABILIDAD DE LAS GUÍAS DE OBSERVACIÓN:**

Observaciones (precisar si hay suficiencia): ...SUFICIENCIA.....

Opinión de aplicabilidad:   Aplicable    Aplicable después de corregir    No aplicable

Nombres y Apellidos	AERLS DE LA ROSA TORO ROJAS	DNI N°	28243292
Dirección domiciliaria	Av. 28 de Julio N° 1044 Piso N° 5	Teléfono / Celular	996294460
Título profesional / Especialidad	Ingeniero Civil -Estructuras	Firma	
Grado Académico	Magister en ciencias -Mención Estructuras	Lugar y fecha	Miraflores/10/02/2022
Metodólogo/ temático			

**Nota:** Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión