



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño de aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) para el puente vehicular Moyoc ubicado en el departamento de Ayacucho

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Huillca Huayhua, Greyssi Sefora
Ñahui Perez, Huber Estif

0000-0001-8722-3319
0000-0002-50370494

ASESOR(ES)

Moreno Sanchez, Javier Daniel

0000-0003-2132-8171

Lima, 15 de noviembre de 2023

DEDICATORIA

“Este presente trabajo de investigación está dedicado a todas las personas que colaboraron para su realización, en especial para mi querida madre y hermano”

Huber Estif Ñahui Pérez

“Agradecida con Dios y mis padres por el apoyo constante”

Greysi Sefora Huillca Huayhua

AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos a nuestros asesores que día a día nos estuvieron apoyándonos incondicionalmente, asimismo agradecemos a nuestros padres, quienes son nuestro pilar fundamental en nuestras vidas.

RESUMEN

En este presente trabajo de investigación se realiza el diseño sísmico de aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) para el puente Moyoc ubicado en el departamento de Ayacucho, el cual consistió en determinar las propiedades mecánicas y geométricas del aislador. El puente Moyoc es de tipo mixto, consta de 02 tramos de 46 m cada uno, constituidos por vigas de acero de alma llena arriostradas con vigas diafragma y tablero de concreto armado de $f'_c=280$ kg/cm². El diseño se realizó bajo requerimientos del AASHTO-LRFD y la Guía de especificaciones para el diseño de aislamiento sísmico de AASHTO (cuarta edición). El predimensionamiento y la viabilidad del aislador sísmico LRB se realizó utilizando el método elástico simplificado. Para la validación del diseño, se realizó mediante el análisis modal espectral y el análisis tiempo historia de la superestructura del puente, para este último se ha utilizado la aceleración sísmica del terremoto de Pisco (15 de agosto 2007) escalado al espectro de diseño. Se utilizó programa CSI BRIDGE V25. Con la incorporación de aislador LRB-500-SM-105/80 en la base de la superestructura, se ha logrado incrementar el periodo efectivo de vibración de la superestructura de 0.5115 seg a 1.652 seg y con ello una reducción de la cortante sísmica en la base del pilar en un 82.28%, en comparación al modelo convencional (apoyos móviles sobre los estribos y apoyos fijos sobre el pilar). La reducción de la fuerza sísmica sobre el pilar es debida también al incremento del amortiguamiento efectivo del puente de 5.00% a 25.00% por la incorporación del aislador sísmico. El aislador LRB-500-SM-105/80 cumple con las solicitaciones de servicio y solicitaciones sísmicas, así mismo, cumple con las verificaciones de estabilidad debido a las cargas laterales y verticales. El puente Moyoc (superestructura) podrá resistir eventos sísmicos de gran magnitud, parecidas al sismo de Pisco del 2007 y no verse afectado la integridad y operatividad con la incorporación del aislador LRB-500-SM-105/80.

Palabras clave: **puente; aislador sísmico; núcleo de plomo; espectro de diseño; amortiguamiento**

ABSTRACT

In this research work, the seismic design of an elastomeric isolator with lead core (LRB) for the Moyoc bridge located in the department of Ayacucho was carried out, which consisted of determining the mechanical and geometrical properties of the isolator. The Moyoc bridge is of mixed type, consisting of two spans of 46 m each, made up of full web steel beams braced with diaphragm beams and a reinforced concrete deck of $f'_c=280 \text{ Kg/cm}^2$. The design was carried out under the requirements of the AASHTO-LRFD and the AASHTO Seismic Isolation Design Specification Guide (fourth edition). The pre-dimensioning and feasibility of the LRB seismic isolator was performed using the simplified elastic method. Design validation was performed by means of spectral modal analysis and time-history analysis of the bridge superstructure, the latter using the seismic acceleration of the Pisco earthquake (August 15, 2007) scaled to the design spectrum. CSI BRIDGE V25 software was used. With the incorporation of the LRB-500-SM-105/80 isolator at the base of the superstructure, the effective period of vibration of the superstructure has been increased from 0.5115 sec to 1.652 sec and with it a reduction of the seismic shear at the base of the abutment by 82.28%, compared to the conventional model (movable supports on the abutments and fixed supports on the abutment). The reduction of the seismic force on the abutment is also due to the increase of the effective damping of the bridge from 5.00% to 25.00% due to the incorporation of the seismic isolator. The LRB-500-SM-105/80 isolator complies with the service and seismic stresses, as well as with the stability checks due to lateral and vertical loads. The Moyoc bridge (superstructure) will be able to withstand seismic events of great magnitude, similar to the Pisco earthquake of 2007, and its integrity and operability will not be affected with the incorporation of the LRB-500-SM-105/80 isolator.

Keywords: bridge; seismic isolator; lead core; design spectrum; damping

u201420514_Greyssi Sefora Huillca Huayhua_Diseño de aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) para el puente vehicular Moyoc ubicado en el departamento de Ayacucho

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 11 % | 11 % | 1 % | 4 % |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | hdl.handle.net Fuente de Internet | 2 % |
| 2 | idoc.pub Fuente de Internet | 1 % |
| 3 | repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet | 1 % |
| 4 | Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante | 1 % |
| 5 | repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet | 1 % |
| 6 | tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet | 1 % |
| 7 | upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet | 1 % |

sigrid.cenepred.gob.pe

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| <u>1</u> | <u>CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO</u> | 17 |
| 1.1 | <u>FILOSOFÍA DEL AISLADOR SÍSMICO</u> | 17 |
| 1.2 | <u>FLEXIBILIDAD</u> | 19 |
| 1.3 | <u>MODELO BILINEAL</u> | 19 |
| 1.3.1 | <u>Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)</u> | 21 |
| <u>2</u> | <u>METODOLOGÍA</u> | 21 |
| 2.1 | <u>PROCEDIMIENTO</u> | 22 |
| 2.1.1 | <u>Características Generales del Puente Moyocc</u> | 22 |
| | <u>En esta etapa se describe las características que componen el puente Moyocc, ubicado en el departamento de Ayacucho.</u> | 22 |
| 2.1.2 | <u>Análisis sísmico de la superestructura</u> | 22 |
| 2.1.3 | <u>Diseño de Aislador Sísmico LRB</u> | 22 |
| 2.1.4 | <u>Verificación del aislador sísmico</u> | 22 |
| 2.1.5 | <u>Diagrama de histéresis del aislador LRB</u> | 22 |
| <u>3</u> | <u>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PUENTE MOYOCC</u> | 24 |
| <u>4</u> | <u>ANÁLISIS SÍSMICO DE LA SUPERESTRUCTURA</u> | 25 |
| 4.1 | <u>CARGAS PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO</u> | 25 |
| 4.1.1 | <u>Cargas Permanentes (DC)</u> | 25 |
| 4.1.2 | <u>Peso muerto (DW)</u> | 25 |
| 4.1.3 | <u>Cargas vivas de Diseño (LL):</u> | 25 |
| 4.2 | <u>ESPECTRO DE DISEÑO PARA EL PUENTE MOYOCC</u> | 27 |
| 4.2.1 | <u>Clases de Sitio</u> | 27 |
| 4.2.2 | <u>Factores de sitio</u> | 29 |
| 4.2.3 | <u>Construcción del Espectro de Respuesta</u> | 31 |
| 4.3 | <u>CRITERIO PARA ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL EN CSI BRIDGE</u> | 33 |
| 4.4 | <u>CRITERIO PARA ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA EN CSI BRIDGE</u> | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.5 | <u>CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO EN CSI BRIDGE V22</u> | 34 |
| 4.6 | <u>PROCEDIMIENTO DE MODELADO</u> | 35 |
| 4.7 | <u>RESULTADOS CONSIDERANDO APOYOS CONVENCIONALES</u> | 36 |
| 4.7.1 | <u>Periodos de vibración</u> | 37 |
| 4.7.2 | <u>Peso sísmico de la estructura</u> | 37 |
| 4.7.3 | <u>Cortante en la base debido a sismo</u> | 37 |
| 4.7.4 | <u>Desplazamientos en los apoyos convencionales debido a sismo</u> | 38 |
| 5 | <u>DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO LRB</u> | 38 |
| 5.1 | <u>DATOS DEL CAUCHO:</u> | 39 |
| 5.2 | <u>DATOS DE LAS PLANCHAS DE ACERO:</u> | 39 |
| 5.3 | <u>DATOS DEL PLOMO</u> | 40 |
| 5.4 | <u>DATOS DEL AISLADOR:</u> | 40 |
| 5.5 | <u>ESPECTRO DE RESPUESTA PARA DISEÑO DE AISLADOR</u> | 41 |
| 5.6 | <u>DESPLAZAMIENTOS DE DISEÑO:</u> | 42 |
| 5.7 | <u>GEOMETRÍA DEL AISLADOR</u> | 43 |
| 5.7.1 | <u>Cálculo de la rigidez de diseño mínimo del sistema (DBE)</u> | 43 |
| 5.7.2 | <u>Cálculo de la rigidez de diseño máximo del sistema (MCE)</u> | 43 |
| 5.7.3 | <u>Cálculo de la rigidez de diseño mínimo para cada aislador (MCE)</u> | 43 |
| 5.7.4 | <u>Cálculo de la mínima rigidez para el sismo máximo</u> | 44 |
| 5.7.5 | <u>Cálculo de la fuerza de desplazamiento nulo (Q_d)</u> | 44 |
| 5.7.6 | <u>Área del núcleo del plomo (A_{pb})</u> | 44 |
| 5.7.7 | <u>Cálculo del diámetro del plomo (dpb)</u> | 44 |
| 5.7.8 | <u>Recálculo del del área del núcleo del plomo (A_{pb})</u> | 45 |
| 5.7.9 | <u>Cálculo de la fuerza de deformación nula del plomo (Q_{pb})</u> | 45 |
| 5.7.10 | <u>Área del aislador-caucho (Q_{pb})</u> | 45 |
| 5.7.11 | <u>Diámetro del aislador (De)</u> | 45 |
| 5.7.12 | <u>Recálculo del área de aislador</u> | 46 |
| 5.7.13 | <u>Verificación del diámetro del plomo</u> | 46 |
| 5.7.14 | <u>Cálculo de la rigidez Post Fluencia (K_p)</u> | 46 |
| 5.7.15 | <u>Cálculo de la altura total del Caucho (H_r)</u> | 46 |
| 5.7.16 | <u>Número de capas de Caucho (nr)</u> | 47 |
| 5.7.17 | <u>Nueva altura total del caucho (H_r)</u> | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.7.18 | <u>Cálculo de la deformación unitaria cortante</u> | 47 |
| 5.7.19 | <u>Cálculo del área reducida debido a la deformación</u> | 47 |
| 5.7.20 | <u>Verificación del espesor de la lámina de acero</u> | 48 |
| 5.7.21 | <u>Número de láminas de acero:</u> | 49 |
| 5.7.22 | <u>Esfuerzo de compresión en las láminas de acero:</u> | 49 |
| 5.7.23 | <u>Verificación de los esfuerzos por compresión en las láminas de acero:</u> | 49 |
| 5.7.24 | <u>Altura neta del aislador de acero:</u> | 50 |
| 5.7.25 | <u>Altura total del aislador más placas de soporte:</u> | 50 |
| 5.7.26 | <u>Verificación final del diámetro de núcleo de plomo:</u> | 50 |
| 5.8 | <u>SELECCIÓN DEL AISLADOR LRB</u> | 51 |
| 5.9 | <u>FACTORES DE MODIFICACIÓN (λ)</u> | 52 |
| 5.10 | <u>RECALCULO DE PARÁMETROS DEL AISLADOR LRB PARA EL MODELO BILINEAL</u> ... 53 | |
| 5.10.1 | <u>Rigidez elástica (Ke)</u> | 53 |
| 5.10.2 | <u>Área total del aislador (A)</u> | 53 |
| 5.10.3 | <u>Rigidez post fluencia (Kp)</u> | 53 |
| 5.10.4 | <u>Amortiguamiento efectivo (Kp)-Effective Damping</u> | 53 |
| 5.10.5 | <u>Relación (Kp/Ke)-post yield stiffness ratio</u> | 54 |
| 5.11 | <u>PARÁMETROS PARA EL MODELO BILINEAL Y MODELADO DE AISLADOR LRB EN CSI BRIDGE</u> | 54 |
| 5.11.1 | <u>Propiedades en la dirección U_1(Dirección Vertical)</u> | 54 |
| 5.11.2 | <u>Propiedades en la dirección U_2 (Dirección X)</u> | 54 |
| 5.11.3 | <u>Propiedades en la dirección U_3 (Dirección Y)</u> | 54 |
| 5.11.4 | <u>Ingreso de datos en el programa CSI Bridge</u> | 54 |
| 5.12 | <u>RESULTADOS CONSIDERANDO AISLADOR SISMICO LRB</u> | 55 |
| 5.12.1 | <u>Período de Vibración</u> | 55 |
| 5.12.2 | <u>Cortante en la base debido a sismo</u> | 55 |
| 5.12.3 | <u>Desplazamiento en los aisladores LRB debido a cargas de sismo</u> | 56 |
| 6 | <u>VERIFICACIONES DEL AISLADOR SISMICO LRB</u> | 57 |
| 6.1.1 | <u>Verificación de la frecuencia vertical:</u> | 57 |
| 6.1.2 | <u>Verificación de la relación entre rigidez vertical y rigidez horizontal:</u> | 58 |
| 6.2 | <u>VERIFICACIÓN A DEFORMACIÓN UNITARIA CORTANTE POR COMPRESIÓN</u> | 58 |
| 6.2.1 | <u>Deformación unitaria cortante por compresión</u> | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.2.2 | <u>Verificación por deformación unitaria cortante por compresión</u> | 59 |
| 6.3 | <u>VERIFICACIÓN A PANDEO</u> | 59 |
| 6.3.1 | <u>Área de corte efectiva</u> | 59 |
| 6.3.2 | <u>Fuerza de corte efectivo (P_s)</u> | 59 |
| 6.3.3 | <u>Inercia del aislador</u> | 59 |
| 6.3.4 | <u>Cálculo de rigidez de giro ($K\theta$)</u> | 59 |
| 6.3.5 | <u>Cálculo de la rigidez de diseño (K_d)</u> | 60 |
| 6.3.6 | <u>Cálculo de carga crítica de pandeo de Euler</u> | 60 |
| 6.3.7 | <u>Cálculo de la carga crítica para pandeo</u> | 60 |
| | <u>Para el cálculo de la carga crítica para pandeo utilizamos la siguiente ecuación</u> | 60 |
| 6.3.8 | <u>Verificación de Pandeo por Carga Axial</u> | 60 |
| 6.3.9 | <u>Verificación de pandeo por carga axial último</u> | 60 |
| 6.4 | <u>VERIFICACIÓN DE DEFORMACIÓN DEL CAUCHO POR CORTANTE SÍSMICO EN LA DIRECCIÓN X</u> | 61 |
| 6.4.1 | <u>Deformación de cortante generada por desplazamiento de cortante</u> | 61 |
| 6.4.2 | <u>Deformación de cortante generada por carga axial</u> | 61 |
| 6.4.3 | <u>Deformación de cortante debido a la rotación angular</u> | 61 |
| 7 | <u>DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DEL AISLADOR LRB</u> | 62 |
| 8 | <u>CONCLUSIONES</u> | 63 |
| 9 | <u>RECOMENDACIONES</u> | 64 |
| 10 | <u>REFERENCIAS</u> | 65 |
| 7 | <u>ANEXOS</u> | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <u>Tabla 1</u> Definición clase de sitio | 27 |
| <u>Tabla 2</u> Resultados de los mapas de aceleración | 29 |
| <u>Tabla 3</u> Valores de Factor de Sitio F_{pga} | 30 |
| <u>Tabla 4</u> Valores de Factor de Sitio F_a | 30 |
| <u>Tabla 5</u> Valores de Factor de Sitio F_v | 30 |
| <u>Tabla 6</u> Zonas Sísmicas | 32 |
| <u>Tabla 7</u> Resumen de variables obtenidas para el espectro de diseño | 32 |
| <u>Tabla 8</u> Resultado de los apoyos | 36 |
| <u>Tabla 9</u> Períodos de vibración | 37 |
| <u>Tabla 10</u> Peso sísmico de la estructura | 37 |
| <u>Tabla 11</u> Cortantes en la base debido al sismo | 37 |
| <u>Tabla 12</u> Desplazamiento en apoyos convencionales debido a sismo en la dirección X ... | 38 |
| <u>Tabla 13</u> Cargas verticales sobre los dispositivos de apoyo..... | 38 |
| <u>Tabla 14</u> Propiedades mecánicas del caucho..... | 39 |
| <u>Tabla 15</u> Propiedades geométricas y mecánicas de planchas de acero | 39 |
| <u>Tabla 16</u> Propiedades geométricas y mecánicas del núcleo de plomo | 40 |
| <u>Tabla 17</u> Propiedades mecánicas y geométricas del aislador | 40 |
| <u>Tabla 18</u> Dimensiones del aislador con núcleo de plomo | 50 |
| <u>Tabla 19</u> Propiedades mecánicas del aislador LRB..... | 51 |
| <u>Tabla 20</u> Período de vibración..... | 55 |
| <u>Tabla 21</u> Cortante en la base debido a sismo..... | 55 |
| <u>Tabla 22</u> Desplazamiento en apoyos con aislador LRB, debido a la carga lateral sísmica en la dirección X..... | 56 |
| <u>Tabla 23</u> Desplazamiento en apoyos con aislador LRB, debido a la carga lateral sísmica en la dirección Y..... | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <u>Figura 1 Comportamiento del puente en los modelos con ERB (A) Y LRB (B)</u> | 15 |
| <u>Figura 2 Comparación de un puente convencional y sísmicamente aislado</u> | 18 |
| <u>Figura 3 Curva de respuesta a la aceleración</u> | 18 |
| <u>Figura 4 Espectro de la respuesta a la aceleración</u> | 19 |
| <u>Figura 5 Efecto de la flexibilidad del aislador en la respuesta del puente</u> | 19 |
| <u>Figura 6 Diagrama de histéresis modelo bilineal</u> | 20 |
| <u>Figura 7 Componentes de un aislador con núcleo de plomo</u> | 21 |
| <u>Figura 8 Flujograma de la metodología</u> | 23 |
| <u>Figura 9 Sección Transversal y dimensiones del Puente Moyoc</u> | 24 |
| <u>Figura 10 Características de camión de diseño</u> | 26 |
| <u>Figura 11 Tándem de diseño</u> | 26 |
| <u>Figura 12 Mapa de Isoaceleración para la obtención del PGA</u> | 28 |
| <u>Figura 13 Mapa de Isoaceleración para la obtención del Ss</u> | 28 |
| <u>Figura 14 Mapa de Isoaceleración para la obtención del S1</u> | 29 |
| <u>Figura 15 Ejemplo de espectro de diseño</u> | 31 |
| <u>Figura 16 Espectro de diseño</u> | 33 |
| <u>Figura 17 Espectro de diseño</u> | 34 |
| <u>Figura 18 Terremoto de Pisco escalador al espectro de diseño</u> | 34 |
| <u>Figura 19 Acotación de la sección típica</u> | 35 |
| <u>Figura 20 Modelo del puente en 3D en el programa CSI Bridge</u> | 36 |
| <u>Figura 21 Reducir el espectro de diseño</u> | 41 |
| <u>Figura 22 Espectro de diseño para el aislador sísmico</u> | 42 |
| <u>Figura 23 Área reducida debido a la deformación</u> | 48 |
| <u>Figura 24 Factores máximo y mínimos de modificación del sistema</u> | 53 |
| <u>Figura 25 Dirección U1; U2; U3</u> | 55 |
| <u>Figura 26 Diagrama de histéresis del comportamiento del aislador LRB LINK 71(sobre el pilar)</u> | 62 |
| <u>Figura 27 Diagrama de histéresis del comportamiento del aislador LRB LINK 65sobre el pilar</u> | 63 |
| <u>Figura 28 Vista General del puente Moyoc, el cual se encuentra constituido por una superestructura mixta de 02 tramos, 02 estribos en cada margen y 01 columna – pila centro</u> | 67 |

| | |
|--|----|
| <u>Figura 29</u> <u>Envolvente de deformaciones en 3D</u> | 67 |
| <u>Figura 30</u> <u>Modo de Vibración 1 considerando apoyos convencionales en la superestructura (apoyo móvil sobre los estribos y apoyo fijo sobre el pilar)</u> | 68 |
| <u>Figura 31</u> <u>Modo de Vibración 1 considerando aisladores sísmicos LRB sobre la superestructura del puente Moyoc</u> | 68 |

INTRODUCCIÓN

El problema

El Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2020), ha realizado un estudio de la deformación cortical y potencial sísmico en la zona de subducción del Perú, se ha obtenido, en base a datos de estaciones geodésicas de velocidades, que existe desplazamiento de la corteza terrestre en el territorio peruano, en la región norte se aprecia un desplazamiento de 5 mm/año en dirección Sureste, en la región centro y sur se aprecia un desplazamiento de 20 mm/año en la dirección Este-Nor-Este, la misma dirección de la convergencia de placas. Por otro lado, en la interfaz de contacto de las placas, los cuales son un conjunto de asperezas distribuidos de manera heterogénea que muestran resistencia a la normal convergencia de placas, generan un bloqueo mecánico, que acumula esfuerzos y deformaciones elásticas en la placa superior por periodos de tiempo prolongados. Así mismo, se ha determinado que las regiones del país poseen diferentes niveles de acumulación de energía sísmica que podría generar sismos considerables. En la zona sur del Perú se tiene lugares con altos niveles de acumulación de energía sísmica, los cuales, a un futuro, podrían generar sismos de gran magnitud.

Debido a que en el Perú existen regiones con alto potencial sísmico, es decir, existe una alta posibilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud. Es necesario garantizar que los diferentes tipos de obras civiles, tales como puentes, se mantengan en servicio sin sufrir daños considerables posterior a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud (terremotos). El puente Moyoc se ubica en la ciudad de Ayacucho, región Sur, lugar donde se espera la ocurrencia de eventos sísmicos mayores a los 8 MW. Los sismos generan desplazamientos considerables en las superestructuras de puentes de varios tramos que podrían comprometer a las demás estructuras, pilares centrales y estribo. Una manera de reducir la transferencia de energía de la superestructura hacia la subestructura es incorporando aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB). La finalidad del aislador es alargar o incrementar el periodo de vibración de la estructura (superestructura en caso de los puentes) de tal manera que se reduzca la aceleración y con ello, la fuerza. Si la fuerza sísmica es menor, generará menor efecto en la superestructura del puente.

¿Cómo se puede reducir el efecto de la fuerza sísmica en los desplazamientos y deformaciones del puente Moyoc ubicado en el departamento de Ayacucho?

Estado del Arte

Según, Paéz y Pérez (2022), señalan que el puente caracol ubicado en la ciudad Bahoyo fue diseñado sin considerar algún tipo de aislador sísmico en su estructura, generando que el puente se encuentre muy vulnerable a sufrir daños provocados por la fuerza de sismo. Es por ello, que en dicha investigación se realiza una comparación de modo cuantitativo de la respuesta sísmica entre un modelo con aislador y el otro modelo convencional con el software Csi bridge. El aislador que se utiliza es el tipo LRB con núcleo de plomo. Se concluye que el comportamiento del puente con el aislador sísmico posee una mayor rigidez y se disminuye la fuerza horizontal que se transmite a la estructura.

Lama y Vásquez (2019), hacen énfasis en la importancia de los puentes como vías de comunicación, es por ello que deben ser diseñados de acuerdo a los factores externos que puedan afectar su seguridad, siendo uno de ellos el sismo. El Perú se encuentra ubicado dentro del cinturón de fuego del océano pacífico, donde se concentra el 85% de la actividad sísmica. En ese sentido, se propone realizar la evaluación de la estructura del puente Reicito ubicado en el departamento de Piura, utilizando dos tipos de aisladores. Siendo el primero el aislador con núcleo de plomo (LRB) y el segundo el aislador con sistema de péndulo friccional (FPS). Para ello los autores utilizan la guía de AASHTO (GSDI) del 2014 y el software Csi. Bridge. Los resultados que obtienen es que el aislador de péndulo friccional posee mayor período de vibración que el aislador de núcleo de plomo. Sin embargo, el aislador con núcleo de plomo tiene un menor desplazamiento longitudinal a comparación del uso de aislador con sistema de péndulo friccional. Se concluye que el aislador sísmico elastómero con núcleo de plomo tiene un mejor comportamiento frente al aislador de péndulo friccional.

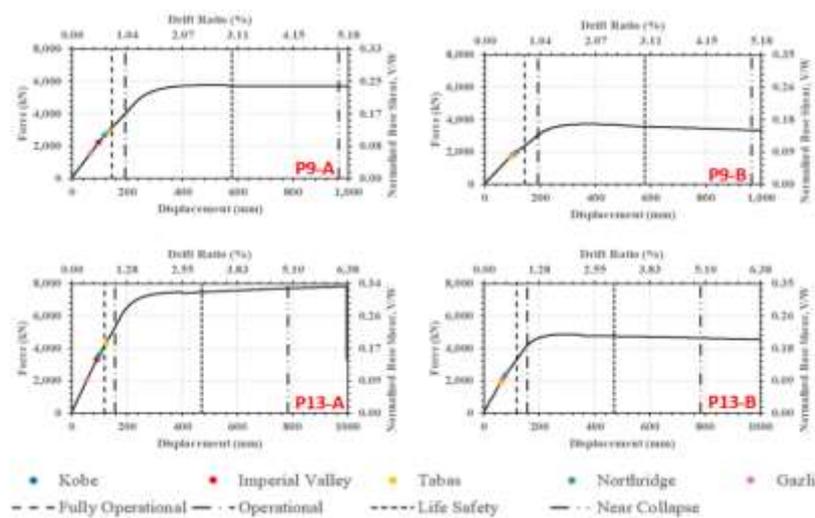
Herrera (2023), realizó un análisis de las ventajas del uso de apoyos convencionales y apoyos con aisladores sísmicos en puente Dueñas, de acuerdo este análisis, se concluyó que el aislador sísmico incrementa el desplazamiento del tablero en 142 % debido a un sismo longitudinal y 214 % debido a un sismo transversal. Así mismo, el aislados sísmico reduce el desplazamiento de la subestructura en 16% debido a un sismo longitudinal y 21 % debido a un sismo transversal. Además, le aislador sísmico reduce la cortante basal del pilar central en un 17% debido al sismo longitudinal y 21 % debido al sismo transversal. Con respecto a los momentos máximos en la base del pilar sucede algo parecido, se tiene una reducción de 16% debido a sismo longitudinal y 21% por sismo transversal.

Según Santoso & et (2022), mencionan que un puente puede fallar significativamente debido a una fuerza sísmica, generando que se produzca el colapso y se incremente el costo de reparación o de sustitución de dicha estructura. Se analiza el puente ubicado en Makkassar,

Indonesia el cual esta clasificado como puente crítico. Se diseña el puente con apoyos de caucho elastomérico (ERB) y luego con aislador de caucho de plomo (LRB) para poder realizar una comparación del comportamiento del puente frente a una fuerza sísmica. Para ello, se analizó el puente mediante el análisis no lineal de historia temporal (NLTHA) con el software OpenSees. Los resultados evidencian que las respuestas máximas de los pilares y los daños eran menores en el modelo con núcleo de plomo que con los apoyos elásticos. El modelo de puente que utiliza ERB muestra un daño en el nivel II, mientras que el que utilizó LRB, estaba en el nivel I. Por lo tanto, el diseño de puente con LRB obtuvo mejores resultados respecto al comportamiento sísmico y en la mitigación de los daños debido a la fuerza sísmica.

Figura 1

Comportamiento del puente en los modelos con ERB (A) Y LRB (B)



Nota. En la figura se observa el comportamiento que tiene el puente con el modelo ERB y LRB, frente a terremotos longitudinales. De “Structural Systems Comparasion of Simply Supported PSC box Girder Bridge Equipped with Elastomer rubber Bearing and Lead Rubber Bearing”, por Santoso & et, 2022

Hipótesis

El diseño de aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB) permite reducir los efectos de la fuerza sísmica en la superestructura del puente Moyocc, alargando el período de vibración de la estructura y reduciendo la aceleración sísmica.

Objetivo General

El objetivo principal es realizar el diseño de aisladores sísmicos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) para el puente vehicular Moyocc ubicado en el departamento de Ayacucho de acuerdo a la normativa del AASHTO LRFD, Manual de Puentes del MTC del 2016, y Guide Specifications for Seismic Isolation Desing del AASHTO (cuarta edición). Para reducir la fuerza sísmica en la estructura del puente.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos para lograr el diseño óptimo del aislador sísmico elastomérico con núcleo de plomo (LRB) para puentes vehiculares, son los siguientes:

- Desarrollar el espectro de respuesta de diseño del puente Moyocc y el espectro de respuesta para el aislador sísmico
- Determinar los desplazamientos y esfuerzos que actúan en el pilar central utilizando apoyos convencionales y aisladores sísmicos, mediante el modelado en el programa CSI Bridge V.25.
- Diseñar el aislador sísmico LRB, lo que implica determinar las propiedades mecánicas y geométricas del aislador (diámetro del aislador, altura del caucho, espesor de láminas de acero, espesor del caucho, diámetros del núcleo de plomo, entre otros)
- Verificar la estabilidad del aislador sísmico LRB debido a cargas verticales y laterales

Limitaciones del proyecto

El diseño del aislador sísmico se realiza bajo las condiciones del estado de servicio y evento extremo neto extremo. Para el diseño del aislador sísmico no se ha considerado considera la influencia del viento y temperatura en la superestructura. Así mismo, existe una limitación para incorporar los atiesadores de las vigas de alma llena del puente Moyocc en el modelado del programa CSI Bridge.

Descripción del Contenido

A continuación, se detalla los capítulos que se abordaran en este presente trabajo de investigación

- **MARCO TEÓRICO:** En este capítulo de redactará los conceptos teóricos fundamentales de las diferentes variables que se utilizaran para el diseño de aisladores sísmicos LRB, tales como, variables para la elaboración del espectro de diseño, variables en análisis modal espectral, el análisis tiempo historia, propiedades específicas de los materiales, entre otros conceptos que sean fundamentales para el entendimiento del trabajo de investigación
- **GENERALIDADES DEL PUENTE MOYOCC:** En este capítulo se detallará las principales características del puente Moyocc, así como dimensiones geométricas, elementos estructurales, ubicación, entre otros
- **PARÁMETROS SISMICOS DEL PUENTE:** En el capítulo se realizará el análisis de los factores de sitio, clase, obtención del PGA, y cálculo del coeficiente sísmico elástico y la construcción del espectro de diseño

- ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL DE LA SUPERESTRUCTURA. En este capítulo se evaluará los desplazamientos longitudinales y transversales, las fuerzas actuantes en el aislador sísmico debido a la carga de sismo, cortante en las direcciones X y Y. Se utilizará el programa CSI Bridge V22
- ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA DE LA SUPERESTRUCTURA: En este capítulo se evaluará los desplazamientos longitudinales y transversales, las fuerzas actuantes en el aislador sísmico utilizando acelerograma de un sismo severo. Se utilizará el programa CSI Bridge V22
- DISEÑO DEL AISLADOR SÍSMICO LRB. En este capítulo se realizará el diseño sísmico del aislador con núcleo de plomo LRB, cálculo de rigidez efectiva, post fluencia, desplazamientos, propiedades mecánicas de las planchas de Caucho, acero y plomo.
- EVALUACION DEL AISLADOR SISMICO ANTE EL EFECTO DE LAS FUERZAS SISMICAS. En este capítulo realizará la evaluación de la incorporación de aislados sísmico en la respuesta de demandas sísmicas del puente, se realizará la verificación de los esfuerzos y desplazamientos
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. En este capítulo realizará el análisis de información del diseño del aislador sísmico LRB, las ventajas y mejoras en la respuesta sísmica del puente Moyoc

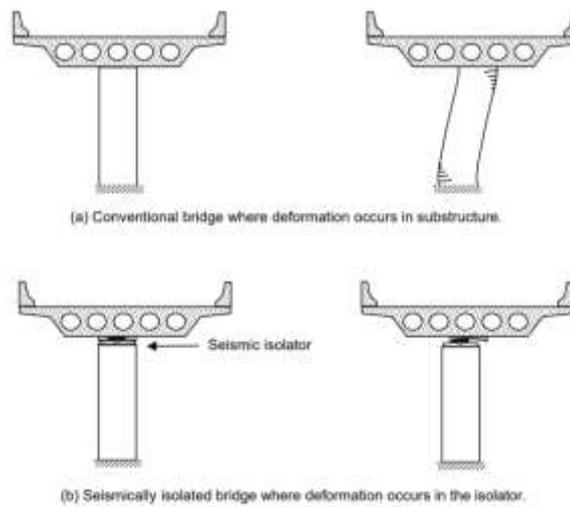
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

Filosofía del Aislador sísmico

Entre sus funciones de un aislador se encuentra: reducir la aceleración, la vibración y la deformación de una estructura. Cuando un puente con aislador es sometido a una fuerza sísmica, la deformación se produce en los aisladores y no en los elementos de la subestructura como se evidencia en la siguiente imagen.

Figura 2

Comparación de un puente convencional y sísmicamente aislado

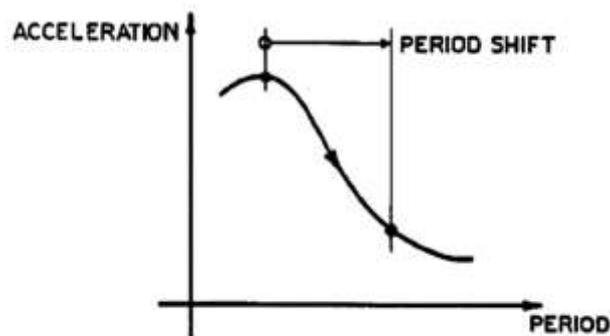


Nota. (a) Puente convencional donde se produce la deformación en la subestructura y (b) Puente con aislador, donde se produce la deformación en el aislador. De *Seismic Isolation of Highway Bridges*. Por Buckle I. et al, 2006

El aislador incrementa el período para reducir la aceleración en una estructura.

Figura 3

Curva de respuesta a la aceleración

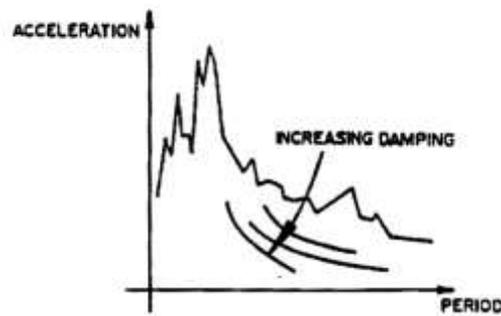


Nota. En la imagen se puede evidenciar que, si un puente se encuentra sin aislador, el período es corto y la aceleración es alta. Sin embargo, si la estructura cuenta con aislador, el período es más largo y la aceleración es corta. De: "Typical acceleration response curve", por AASHTO, 2014

El aislador produce un amortiguamiento del 30% en la estructura, reduciendo el efecto de la aceleración.

Figura 4

Espectro de la respuesta a la aceleración



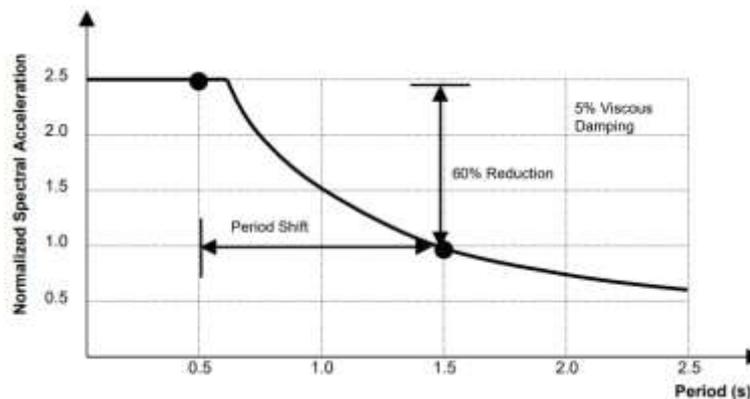
Nota. En la figura se muestra que cada vez que se incrementa el nivel de amortiguamiento, el espectro decrece. De. "Acceleration response spectrum", por AASHTO, 2014

Flexibilidad

El efecto que produce la flexibilidad del aislador se evidencia en la figura 2, donde se muestra el espectro de respuesta de aceleración con un amortiguamiento del 5%. Además, se observa el cambio de período de 0,5 a 1,5 segundos debido a la flexibilidad del aislador, disminuyendo en un 60% las fuerzas sísmicas.

Figura 5

Efecto de la flexibilidad del aislador en la respuesta del puente



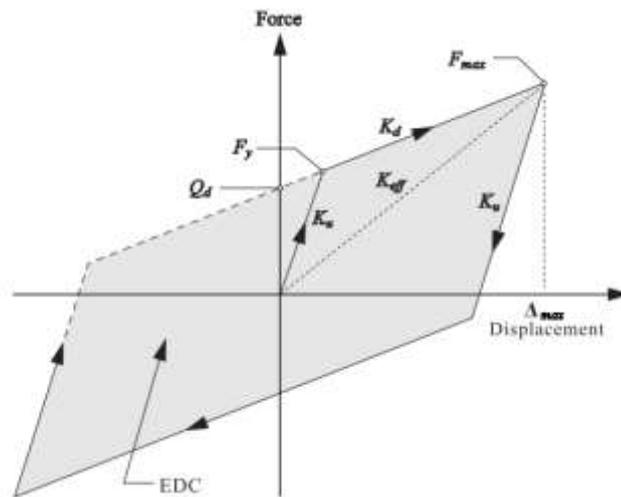
Nota. En la imagen se evidencia la respuesta de aceleración. De Seismic Isolation of Highway Bridges. Por Buckle I. et al (2006)

Modelo bilineal

El comportamiento del aislador sísmico se ve reflejado en el modelo bilineal, cuando la fuerza sísmica supera la fuerza Q_d el aislador empieza a desplazarse y presenta una rigidez de post fluencia, llegando a una fuerza y desplazamiento máximo. La fuerza retorna por una rigidez elástica formando un ciclo histerético como se puede apreciar en la figura 6.

Figura 6

Diagrama de histéresis modelo bilineal



Nota. De. "Typical Section of a Lead-Rubber Isolator", por AASHTO, 2014

Donde,

Q_d : Fuerza característica; F_y : Fuerza de fluencia

K_d : Rigidez post fluencia; K_u : Rigidez elástica

K_{eff} : Rigidez efectiva; Δ_{max} : Desplazamiento máximo

EDC : Energía disipada por ciclo

1.4 Amortiguamiento

Es la capacidad que tiene un sistema para disipar la energía. Disminución progresiva de la intensidad de un fenómeno periódico.

1.5 Periodo de vibración

Es el tiempo que tarda en dar una vibración una estructura en la forma que moviliza la mayor parte de su masa.

1.6 Desplazamiento de diseño

El diseño de desplazamiento en un aislador, para la fuerza sísmica lateral es el desplazamiento máximo longitudinal, el cual se emplea para hallar la rigidez efectiva (K_{eff}).

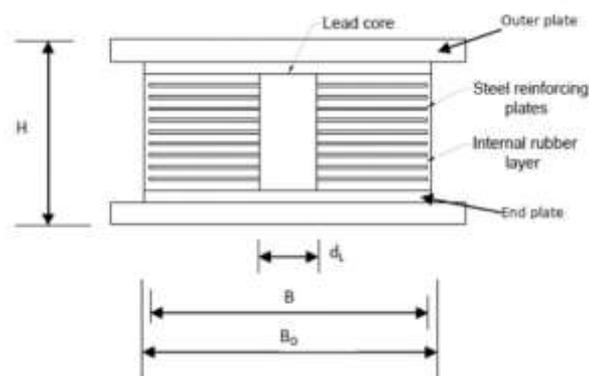
Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

Este tipo de aislador sísmico proporciona una rigidez inicial alta, reduciendo los desplazamientos que producen los sismos y las fuerzas de viento en la estructura. Está conformado por láminas de caucho alternados con placa de acero. El desempeño del aislador LRB depende de la fuerza lateral, cuando esta sea menor será absorbida por el núcleo de plomo y si se incrementa, el núcleo de plomo empezará a fluir y se deformará. Según Rico y Chio (2012), el amortiguamiento que presenta se encuentra dentro del rango del 15% al 35%. Cuando el núcleo de plomo se encuentra plastificado se asegura que el amortiguamiento se incremente y se obtenga mayor rigidez lateral del tablero. El dispositivo LRB presenta una rigidez inicial 10 veces superior a la rigidez, debido al movimiento del núcleo de plomo. Actualmente, este tipo de aislador LRB es la solución más frecuente para los puentes, debido a su sencillez, comportamiento y bajo costo.

En la siguiente imagen se puede observar las partes que componen el aislador LRB, los cuales son: núcleo de plomo, caucho natural, placa de refuerzo de acero, cubierta de goma y la brida

Figura 7

Componentes de un aislador con núcleo de plomo



Nota. "Typical Section of a Lead-Rubber Isolator", por AASHTO, 2014

METODOLOGÍA

En el presente trabajo de investigación se ha contemplado proponer la siguiente metodología para lograr los objetivos propuestos:

- Nivel de Investigación: Descriptivo – Explicativo
- Diseño de Investigación: Documental – Experimental

Procedimiento

La investigación constará de 5 capítulos, los cuales tendrán el siguiente desarrollo:

Características Generales del Puente Moyocc

En esta etapa se describe las características que componen el puente Moyocc, ubicado en el departamento de Ayacucho.

Análisis sísmico de la superestructura

En este capítulo se abarca el desarrollo de los metrados de carga, el espectro de diseño, los criterios para el análisis tiempo historia en el programa csi bridge v22 y los resultados sísmicos, utilizando apoyos convencionales en el puente Moyocc.

Diseño de Aislador Sísmico LRB

Comprende el cálculo de los datos necesarios para el diseño del aislador con núcleo de plomo, asimismo se desarrolla las propiedades de dicho aislador.

Verificación del aislador sísmico

En este paso se evalúa la estabilidad del aislador en la respuesta de las demandas sísmicas del puente.

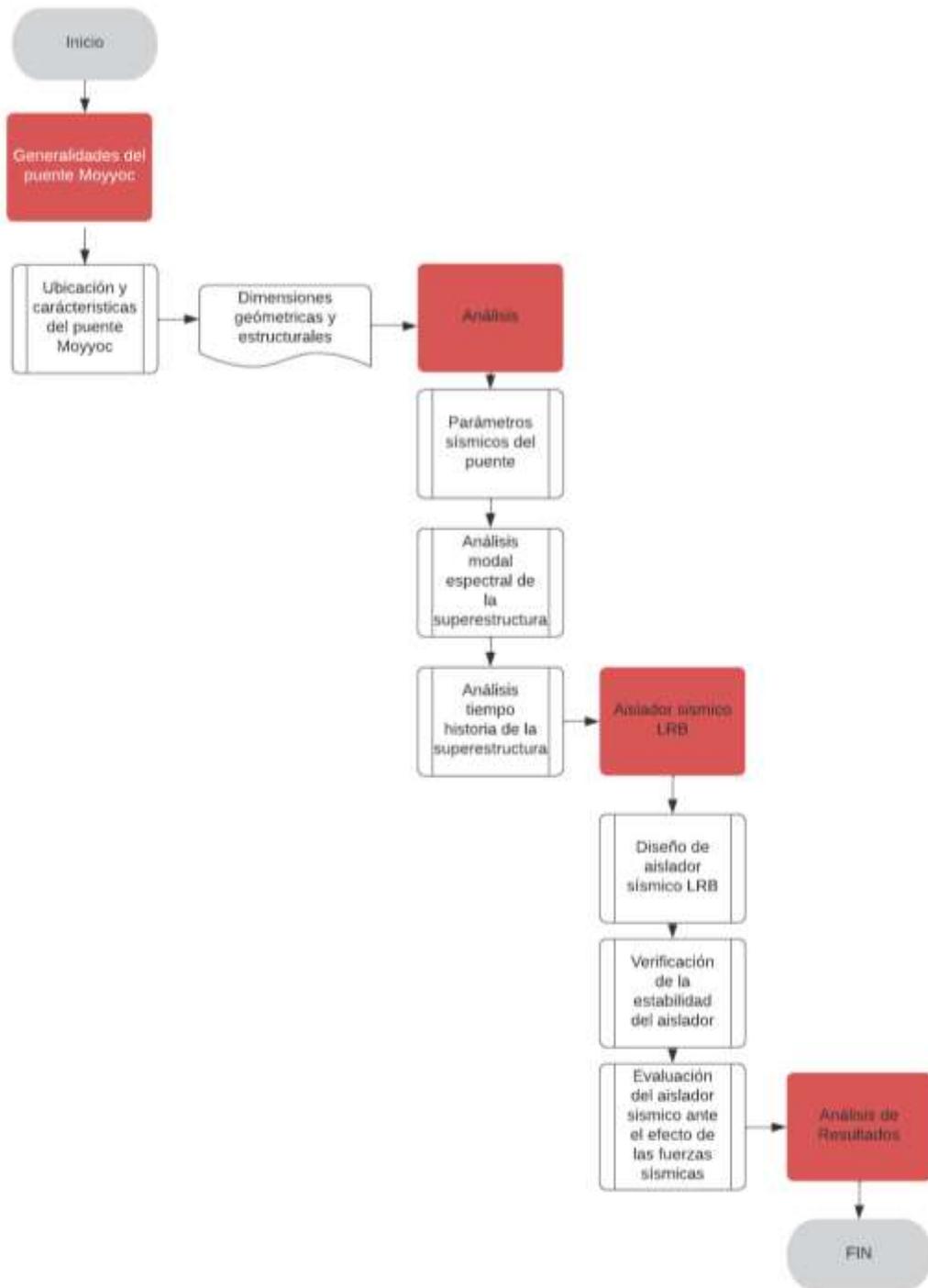
Diagrama de histéresis del aislador LRB

Utilizando el programa csi bridge v22 se muestra el diagrama de histéresis donde se evidencia el comportamiento del aislador y se evidencian los desplazamientos generados por la fuerza sísmica.

En el siguiente flujograma se muestra el desarrollo del procedimiento de esta investigación.

Figura 8

Flujograma de la metodología

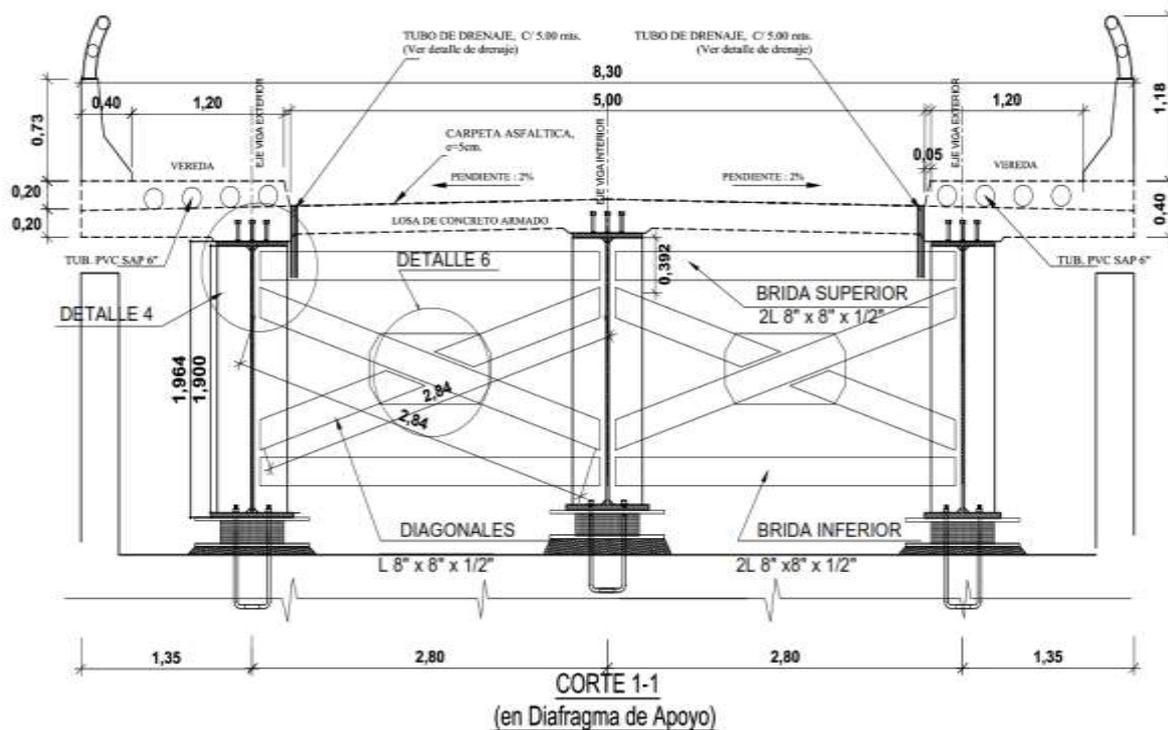


CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PUENTE MOYOCC

El puente Moyocc está ubicado en el departamento de Ayacucho, provincia de Cangallo, Anexo de Moyocc. La superestructura del puente está conformada por vigas metálicas de alma llena arriostradas con vigas diafragma; y elementos de concreto armado $f'c=280$ Kg/cm² (tablero de losa, veredas y barreras de seguridad tipo New jersey). El puente Moyocc consta de 02 tramos de 46 m cada uno, con una luz libre de 91 m. La subestructura está conformada por estribos en ambas márgenes (izquierdo y derecho) fundadas en 09 pilotes de 30 de longitud de concreto armado en cada estribo y una columna-pila en el centro de luz (pilar central). Así mismo, el puente Moyocc tiene la clasificación de tipo puente esencial, debido a que el periodo de retorno considerado es de 1000 años. A continuación, se muestra una vista transversal y longitudinal del puente Moyocc.

Figura 9

Sección Transversal y dimensiones del Puente Moyocc



Nota. Adaptado de “Proyecto de Creación de Puente Vehicular sobre el río Moyocc del distrito de Cangallo, Provincia de Cangallo, Departamento de Ayacucho”, por Gobierno Regional de Ayacucho, 2020.

ANÁLISIS SÍSMICO DE LA SUPERESTRUCTURA

CARGAS PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO

En este capítulo se realizará el metrado de cargas de acuerdo con la normativa AASHTO-LRFD y la Guía de especificaciones para el diseño de aislamiento sísmico del AASHTO.

Cargas Permanentes (DC)

Son los pesos propios de los componentes estructurales y demás accesorios no estructurales. En esta sección se especifica las cargas permanentes a ser considerados de acuerdo con la configuración geométrica de la superestructura del puente Moyoc:

- Peso por estructuras metálicas (vigas de alma llena y vigas diafragmas)

Peso Total de la estructura metálica: $[99.12 + 2.72 + 8.10 + 2.10] \times 2 = 224.08 \text{ Tn}$

- Peso del tablero de concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$:

Peso propio: $2.40 \times \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} \times 46.00 \text{ m} \times 9.20 \text{ m} \times 0.20 \text{ m} \times 2 = 406.27 \text{ tn}$

- Peso de veredas de concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$

Peso propio: $2.40 \times \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} \times 1.60 \text{ m} \times 46.00 \text{ m} \times 0.20 \text{ m} \times 4 = 141.31 \text{ tn}$

- Peso de Barrera de Seguridad concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$

Peso propio: $2.40 \times \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} \times 0.19 \text{ m}^2 \times 46.00 \text{ m} \times 4 = 83.90 \text{ tn}$

Peso Total de la superestructura =855.57 Tnf

Peso muerto (DW)

Son los pesos propios de la superficie de rodadura e instalaciones no estructurales para los servicios públicos

- Peso por asfalto:

Peso propio: $2.24 \times \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} \times m \times 0.05 \text{ m} = 0.112 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^2}$

Cargas vivas de Diseño (LL):

- Se considera para aquello que produzca el efecto más desfavorable: Camión HL-93 o camión Tándem
- Sobrecarga de carril distribuida

Cargas de diseño móvil

- Camión de diseño HL-93:

La carga por eje y los espaciamientos entre ejes serán de acuerdo con la siguiente figura mostrada:

Figura 10

Características de camión de diseño

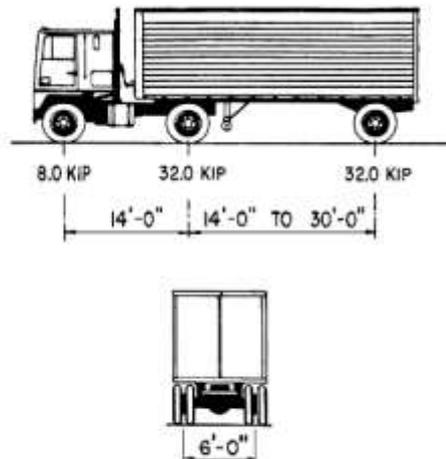


Figure 3.6.1.2.2-1—Characteristics of the Design Truck

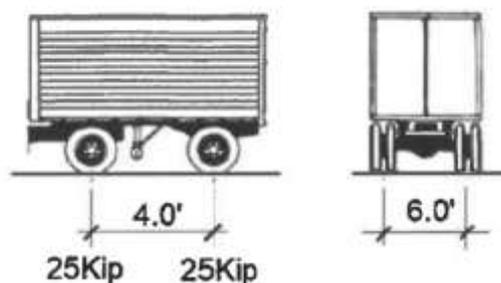
Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

- Tándem de diseño:

Consiste en un conjunto de dos ejes, cada una con una carga de 11.2 Tn espaciadas longitudinalmente a 1.20 m y transversalmente a 1.80 m, de acuerdo con la siguiente figura:

Figura 11

Tándem de diseño



Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

- Carga de carril de diseño:

Consiste en una sobrecarga de 0.96 Tn/m uniformemente distribuida en dirección longitudinal sobre aquellas zonas del puente que sean desfavorables. Esta carga se distribuye en un ancho transversal de 3 m

ESPECTRO DE DISEÑO PARA EL PUENTE MOYOCC.

Clases de Sitio

De acuerdo con la tabla de 2.4.3.11.2.1.1-1 del manual de Puentes, correspondiente a la clase de sitio. De los ensayos de Refracción sísmica y ensayo MASW-1D realizados en el lugar, se concluye, que el puente es de CLASE E

Tabla 1

Definición clase de sitio

(Tabla 3.10.3.1-1 AASHTO)

| Clases de Sitio | Tipo de Suelo y Perfil |
|-----------------|---|
| A | Roca dura con medida de velocidad de onda de corte, $\bar{v}_s > 5,000$ ft/s |
| B | Roca con $2,500$ ft/s $< \bar{v}_s < 5,000$ ft/s |
| C | Suelo muy denso y roca suelo $1,200$ ft/s $< \bar{v}_s < 2,500$ ft/s, o con cualquiera $N > 50$ golpes/ ft, o $\bar{S}_u > 2.0$ ksf |
| D | Suelo rígido con 600 ft/s $< \bar{v}_s < 1,200$ ft/s, o con cualquiera $15 < N < 50$ golpes/ ft, o $1.0 < \bar{S}_u < 2.0$ ksf |
| E | Perfil de suelo con $\bar{v}_s < 600$ ft/s o con cualquiera $N < 15$ golpes/ ft o $\bar{S}_u < 1.0$ ksf, o cualquier perfil con más de 10 ft de arcilla blanda definida como suelo con $PI > 20$, $w > 40$ por ciento y $\bar{S}_u < 0.5$ ksf |
| F | Suelos que requieren evaluaciones específicas de sitio, tales como: <ul style="list-style-type: none"> • Turbas o arcillas altamente orgánicas ($H > 10$ ft de turba o arcilla altamente orgánica donde H = espesor del suelo) • Arcillas de alta plasticidad ($H > 25$ ft con $PI > 75$) • Estratos de Arcillas de buen espesor, blandas o semirrígidas ($H > 120$ ft) |

Excepciones: Cuando las propiedades del suelo no son conocidas con suficiente detalle para determinar la clase de sitio, se emprenderá una investigación de sitio suficiente para definir su clase. Las clases de Sitio E o F no serán supuestas a no ser que la Entidad determine la clase de sitio E o F o estas sean establecidas por datos geotécnicos.

Nota. De "Manual de puentes", por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.

(https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

- Obtención de PGA (Aceleración máxima horizontal)

Figura 12

Mapa de Isoaceleración para la obtención del PGA



Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

$$PGA=0.40\text{ g}$$

Figura 13

Mapa de Isoaceleración para la obtención del S_s



Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

$$S_s = 1.02g$$

Figura 14

Mapa de Isoaceleración para la obtención del S1



Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

$$S_1 = 0.38 g$$

De los mapas de Aceleración, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 2

Resultados de los mapas de aceleración

| | |
|------------|---------------|
| PGA | 0.40 g |
| SS | 1.02 g |
| S1 | 0.38 g |

Factores de sitio

Para obtener los factores de Sitio F_{pga}, F_a, F_v

Tabla 3

Valores de Factor de Sitio F_{pga}

Valores de Factor de Sitio, F_{pga} En Periodo-Cero en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-1 AASHTO)

| Clase de Sitio | Coeficiente Aceleración Pico del Terreno (PGA) ¹ | | | | |
|----------------|---|------------|------------|------------|------------|
| | PGA < 0.10 | PGA = 0.20 | PGA = 0.30 | PGA = 0.40 | PGA > 0.50 |
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| C | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |
| D | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.0 |
| E | 2.5 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 0.9 |
| F ² | * | * | * | * | * |

Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

$$F_{pga} = 1.10$$

Tabla 4

Valores de Factor de Sitio F_a

Valores de Factor de Sitio, F_a , Para rango de Periodo Corto en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-2 AASHTO)

| Clase de Sitio | Coeficiente Aceleración Espectral en Periodo 0.2 sec (S_s) ¹ | | | | |
|----------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $S_s < 0.25$ | $S_s = 0.50$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 1.00$ | $S_s > 1.25$ |
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| C | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |
| D | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.0 |
| E | 2.5 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 0.9 |
| F ² | * | * | * | * | * |

Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

Realizando la interpolación lineal se obtiene $F_a = 1.092$

Tabla 5

Valores de Factor de Sitio F_v

Valores de Factor de Sitio, F_v , Para rango de Periodo Largo en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-3 AASHTO)

| Clase de Sitio | Coeficiente Aceleración Espectral en Periodo 1.0 sec (S_1) ¹ | | | | |
|----------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | $S_1 < 0.1$ | $S_1 = 0.2$ | $S_1 = 0.3$ | $S_1 = 0.4$ | $S_1 > 0.5$ |
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| C | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| D | 2.4 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| E | 3.5 | 3.2 | 2.8 | 2.4 | 2.4 |
| F ² | * | * | * | * | * |

Nota. De “Manual de puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

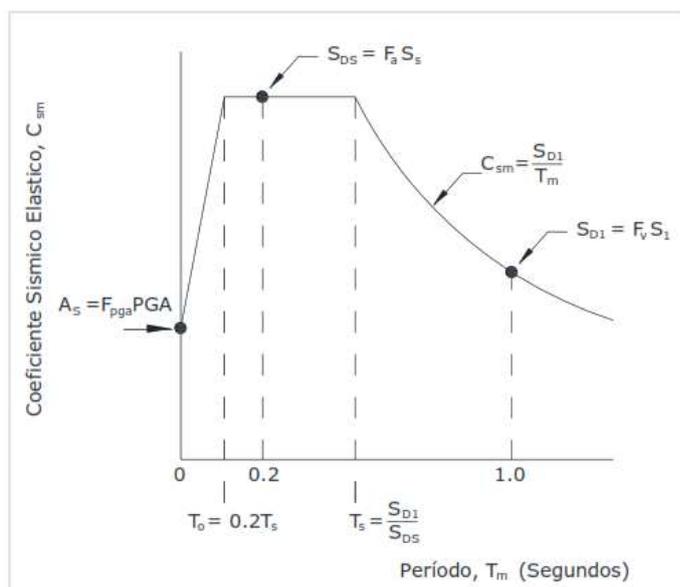
Realizando la interpolación lineal se obtiene $F_v = 1.64$

Construcción del Espectro de Respuesta

Para elaborar el diseño del espectro de respuesta se deberá determinar el coeficiente sísmico elástico C_{sm} para periodo $T_m = 0.00 \text{ seg}$, $T_m = 0.20 \text{ seg}$ y $T_m = 1.00 \text{ seg}$

Figura 15

Ejemplo de espectro de diseño



Nota. De “Manual de Puentes”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

- Coeficiente de respuesta sísmico elástico

Para periodos menores o iguales a T_0 , el coeficiente sísmico elástico C_{sm} se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$C_{sm} = A_s + (S_{DS} - A_s) \times \left(\frac{T_m}{T_0}\right)$$

$$A_s = F_{pga} \times PGA$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s$$

Donde:

S_s : Coeficiente de aceleración de respuesta espectral horizontal en 0.2 segundos de periodo sobre roca

T_m : Periodo de vibración del modo

T_0 : Periodo de referencia usado para definir la figura espectral

Para periodos mayores o iguales a T_0 y menores o iguales a T_s , el C_{sm} se obtendrá de la siguiente manera:

$$C_{sm} = C_{DS}$$

Para periodos mayores a T_s , el C_{sm} se obtendrá de la siguiente manera:

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T_m}$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1$$

- Zona sísmica

La zona sísmica se establece en función al valor de S_{D1} de acuerdo a la siguiente tabla. Para un valor de $S_{D1} = 0.623$

Tabla 6

Zonas Sísmicas

(3.10.6-1 AASHTO)

| Coeficiente de Aceleración, S_{D1} | Zona Sísmica |
|--------------------------------------|--------------|
| $S_{D1} \leq 0.15$ | 1 |
| $0.15 < S_{D1} \leq 0.30$ | 2 |
| $0.30 < S_{D1} \leq 0.50$ | 3 |
| $0.50 < S_{D1}$ | 4 |

Nota. De "Manual de puentes", por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016 (https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf).

De acuerdo a esta tabla, se tiene zona sísmica igual a 4 ($Z=4$)

- Espectro de Diseño

Reemplazando en las ecuaciones, a continuación, se muestra el resumen de las variables obtenidas para el espectro de diseño:

Tabla 7

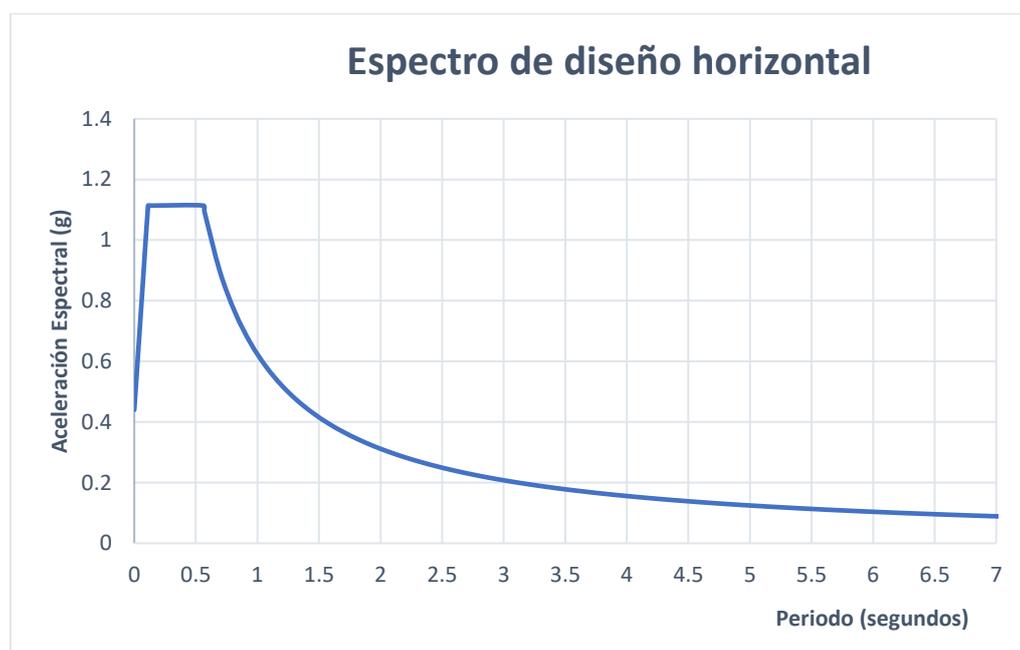
Resumen de variables obtenidas para el espectro de diseño

| | |
|------------------------|--------------|
| PGA | 0.40g |
| SS | 1.02g |
| S1 | 0.38g |
| Fp_{ga} | 1.10 |
| Fa | 1.092 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| <i>F_v</i> | 1.64 |
| <i>SD1</i> | 0.623g |
| <i>SDS</i> | 1.114g |
| <i>T_s</i> | 0.560 seg |
| <i>T_o</i> | 0.112 seg |
| <i>A_s</i> | 0.440g |

Figura 16

Espectro de diseño



CRITERIO PARA ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL EN CSI BRIDGE

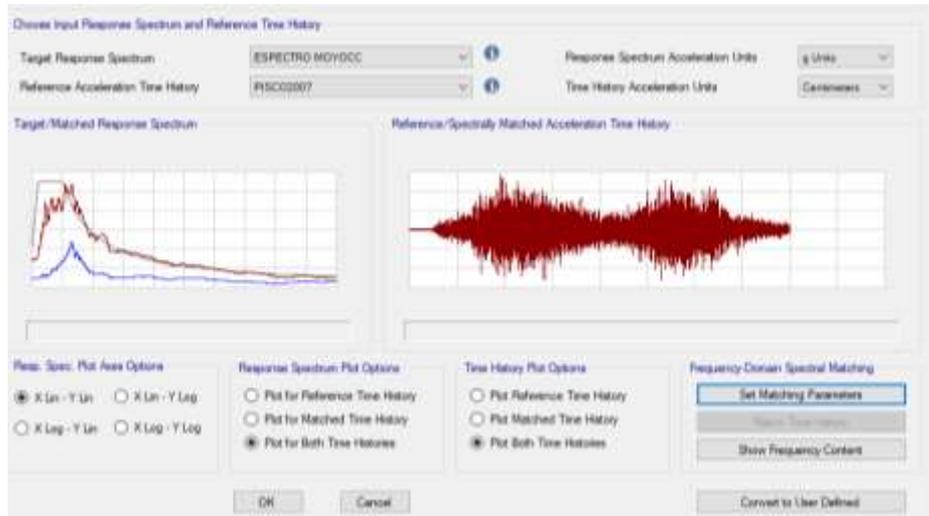
El espectro de diseño para el análisis sísmico del puente Moyocc, será el presentado en el capítulo 4.2 Espectro de diseño

CRITERIO PARA ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA EN CSI BRIDGE

Para el análisis sísmico tiempo historia se utilizará los datos sísmicos del terremoto ocurrido el 15 de agosto del 2007 en la ciudad de Pisco. A continuación, se muestra el acelerograma de dicho evento sísmico en la dirección EW

Así mismo, los datos sísmicos del terremoto de pisco deben estar escalados con respecto al espectro de diseño del puente Moyocc. Esto se puede lograr con la herramienta Time History Matched to Response Spectrum del programa CSI Bridge. A continuación, se muestra el procedo de escalamiento:

Figura 17
Espectro de diseño



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

Finalmente se muestra el escalamiento de la aceleración del terremoto de Pisco con el espectro de diseño:

Figura 18
Terremoto de Pisco escalador al espectro de diseño



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO EN CSI BRIDGE V22

- Tipo de estructura: Mixta (Concreto Armado y estructura metálica)
- Resistencia de Concreto: $f^c=280 \frac{Kg}{cm^2}$ (para el tablero, veredas y pilar central)
- Número de tramos: 2.00

- Longitud de Tramo: 46.00 m
- Longitud Total: 92.00 m
- Número de carril: 2.00
- Ancho de carril: 3.00 m
- Ancho de veredas: 1.60 m (a cada lado)

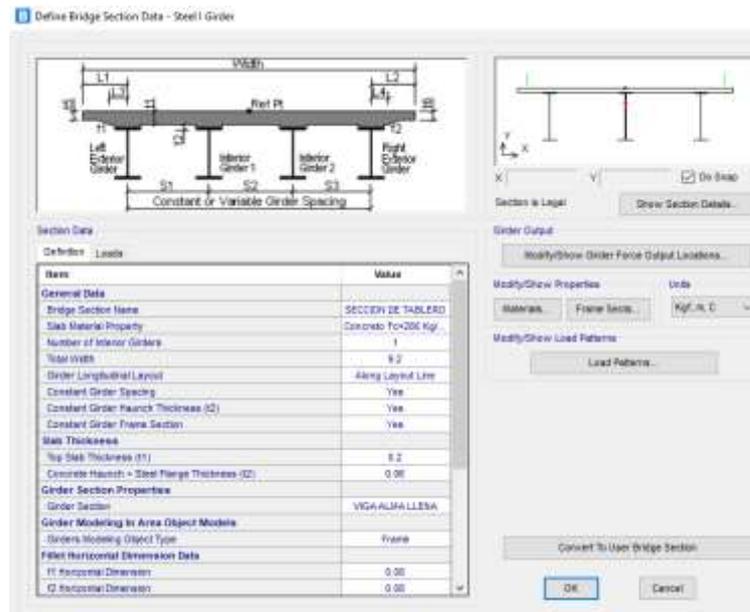
PROCEDIMIENTO DE MODELADO

Es necesario conocer el comportamiento de la superestructura de puente Moyocc ante una demanda sísmica, ya que nos permitirá, obtener valores casi exactos de los periodos de vibración, desplazamientos longitudinales y transversales, fuerzas cortantes, cargas axiales, entre otros que será fundamentales para el diseño del aislador sísmico con núcleo de plomo. Para ello se hace uso de programa CSI Bridge V22.

- Se ingresan las propiedades de los materiales, así como las propiedades de las secciones (vigas de alma llena, vigas diafragma, vigas cabezal y el pilar central). Posterior a ello se asigna la sección típica de puente (ancho de carril, espesor de tablero, ancho de veredas, espesor de veredas). A continuación, se muestra las figuras de la acotación de la sección típica.

Figura 19

Acotación de la sección típica

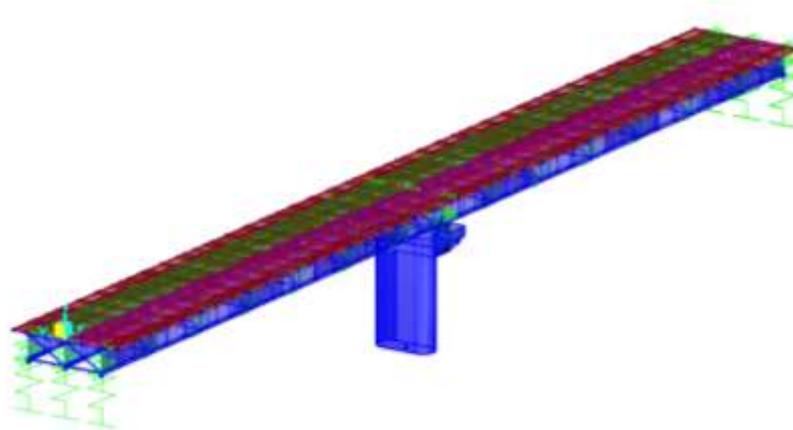


Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

- Se procede a la asignación de cargas permanentes, muertas y vivas (debido al Camión de Diseño HL-93 y camión de diseño Tándem) sobre la superestructura y las combinaciones de carga para estado de servicio.
- Para el análisis modal espectral, se procede a importar el espectro de diseño elaborado en la sección 6.2 Espectro de Diseño.
- Para el análisis tiempo historia, se asignó, los datos sísmicos de la estación acelerográfica de código LIM004 Casa Dr. Piqué. De acuerdo a los considerado en la sección 6.4 Consideraciones para el análisis tiempo historia en programa CSI Bridge
- Finalmente, se muestra el modelo del puente en 3D en el programa CSI Bridge

Figura 20

Modelo del puente en 3D en el programa CSI Bridge



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

RESULTADOS CONSIDERANDO APOYOS CONVENCIONALES

En el modelo convencional se ha utilizado dispositivos de apoyo fijo y móvil en la base de la superestructura, de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 8

Resultado de los apoyos

| UBICACIÓN | NÚMERO DE APOYOS | TIPO DE APOYO |
|--------------------------|------------------|---------------|
| Estribo derecho | 3.00 | Apoyo móvil |
| Pilar Central | 6.00 | Apoyo Fijo |
| Estribo izquierdo | 3.00 | Apoyo móvil |

Periodos de vibración

Tabla 9

Períodos de vibración

| Periodo (Apoyos convencionales) | | |
|--|----------------------|-------------------|
| Modo | Periodo (seg) | Frecuencia |
| 1 | 0.5115 | 1.955 |
| 2 | 0.4675 | 1.753 |

Peso sísmico de la estructura

Del análisis modal espectral, se obtiene el peso sísmico para el puente Moyocc considerado para el estado de servicio.

Tabla 10

Peso sísmico de la estructura

Peso Sísmico de la estructura (sistema)

1010.65 Tnf

Cortante en la base debido a sismo

Tabla 11

Cortantes en la base debido al sismo

| Apoyos convencionales | | | |
|------------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| Descripción | Dirección | Cortante (Tn) | Momento (Tn.m) |
| SISMO X-X | X-X | 792.98 | 181.92 |
| | Y-Y | 199.02 | 8065.58 |
| | Z-Z | 7.90 | 9477.17 |
| SISMO Y-Y | Y-Y | 663.35 | 765.99 |
| | X-X | 218.55 | 2643.25 |
| | Z-Z | 8.68 | 31347.22 |

Desplazamientos en los apoyos convencionales debido a sismo

Desplazamientos en los apoyos convencionales debido a sismo en la dirección X

En la siguiente tabla se muestra los desplazamientos en los apoyos de la superestructura considerando apoyos móviles sobre los estribos (derecho e izquierdo) y apoyos fijos en la pila central. Debido a la carga lateral sísmica en la dirección X

Tabla 12

Desplazamiento en apoyos convencionales debido a sismo en la dirección X

| DEZPLAZAMIENTOS EN LOS APOYOS FIJOS | | | | | |
|-------------------------------------|------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| N° de aislador | Link | Caso de carga | U1 | U2 | U3 |
| | | | cm | cm | cm |
| 1.0 | 59.0 | TH PISCO UX | -0.077677 | 0.02297 | -8.453972 |
| 2.0 | 62.0 | TH PISCO UX | -0.079402 | 0.030721 | -8.432074 |
| 3.0 | 65.0 | TH PISCO UX | -0.088851 | -0.000101 | -8.457255 |
| 4.0 | 68.0 | TH PISCO UX | -0.085217 | -0.000055 | -8.45544 |
| 5.0 | 71.0 | TH PISCO UX | -0.077692 | -0.026023 | -8.453968 |
| 6.0 | 74.0 | TH PISCO UX | -0.079396 | -0.034439 | -8.432076 |

Cargas verticales sobre los dispositivos de apoyo

En la siguiente table se muestra las cargas verticales a compresión sobre los dispositivos de apoyo

Tabla 13

Cargas verticales sobre los dispositivos de apoyo

| Dispositivos de apoyo | | |
|--------------------------------|------------|---------------|
| Descripción | Símbolo | Momento (tnf) |
| Carga estática vertical máxima | P_{ELU} | 249.83 |
| Carga sísmica vertical máxima | P_{SISM} | 163.16 |
| Peso sísmico sobre el aislador | W | 134.00 |

DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO LRB

El diseño del aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) se realiza de acuerdo a los requerimientos exigidos en la guía de especificaciones para el diseño de diseño sísmico (GUIDE SPECIFICATIONS FOR SEISMIC SOLATION DESING) del AASHTO cuarta edición. Para el diseño inicial de aislador LRB y la verificación de su viabilidad para uso en el

puente Moyoc se utilizará el método elástico simplificado, como punto de partida, el cual es una variante del método de análisis basado en el desplazamiento. Posteriormente se realizará la verificación con los métodos espectral multimodo y tiempo historia.

Datos del caucho:

En la tabla 19 se muestra las propiedades mecánicas del caucho que se utilizaran en el diseño

Tabla 14

Propiedades mecánicas del caucho

| Datos del Caucho | | | |
|---|--------------------|---------------|--------------|
| Descripción | Símbolo | Unidad | Valor |
| Módulo de elasticidad del Caucho | E | kg/cm^2 | 15.296 |
| Módulo de Corte del Caucho | G | kg/cm^2 | 4.589 |
| Módulo volumétrico del Caucho (BULK) | K | kg/cm^2 | 20394.00 |
| Esfuerzo Admisible a compresión del Caucho | $\sigma_{Cr\ máx}$ | kg/cm^2 | 90.00 |
| Espesor inicial de capa caucho | t_r | mm | 8.00 |
| Deformación unitaria cortante de diseño | γ_s | % | 450 |
| Elongación a la ruptura mínima | ε_u | % | 650 |

Datos de las planchas de acero:

En la siguiente tabla se muestran las propiedades geométricas y mecánicas de las planchas de Acero que se utilizaran en este diseño:

Tabla 15

Propiedades geométricas y mecánicas de planchas de acero

| Datos del Acero | | | |
|---|----------------|---------------|--------------|
| Descripción | Símbolo | Unidad | Valor |
| Límite de fluencia de láminas de Acero | f_{ys} | kg/cm^2 | 2400.0 |
| Espesor de lámina de acero propuesto | t_s | mm | 4.0 |

Datos del plomo

En la siguiente tabla se muestran las propiedades geométricas y mecánicas del núcleo de plomo que se utilizarán en este diseño:

Tabla 16

Propiedades geométricas y mecánicas del núcleo de plomo

| Datos del plomo | | | |
|--|----------------|---------------|--------------|
| Descripción | Símbolo | Unidad | Valor |
| Módulo de elasticidad del plomo | E_{pb} | kgf/cm^2 | 163154.00 |
| Límite de fluencia mínimo del plomo | f_{ypb} | kgf/cm^2 | 90.00 |
| Módulo cortante del plomo | G_{pb} | kgf/cm^2 | 57104.00 |
| Diámetro del plomo | D_{pb} | cm | 8.00 |
| Espesor inicial de capa caucho | t_r | mm | 8.00 |

Datos del aislador:

En la siguiente tabla se muestran las propiedades geométricas y mecánicas del aislador que se utilizarán en este diseño

Tabla 17

Propiedades mecánicas y geométricas del aislador

| Datos del Aislador | | | |
|--|---------------------------|---------------|--------------|
| Descripción | Símbolo | Unidad | Valor |
| Plancha Superior e inferior interna del aislador | t_{ip} | mm | 20.00 |
| Planchas Exteriores o de soporte | t_{ext} | mm | 25.00 |
| Relación de Rigidez elástica y Rigidez Post Fluencia | ψ | - | 6.40 |
| Esfuerzo Admisible a compresión del Caucho | $\sigma_{Cr \text{ máx}}$ | kg/cm^2 | 90.00 |
| Coefficiente para la mayoración de la rigidez post fluencia debido al plomo | F_L | - | 1.15 |

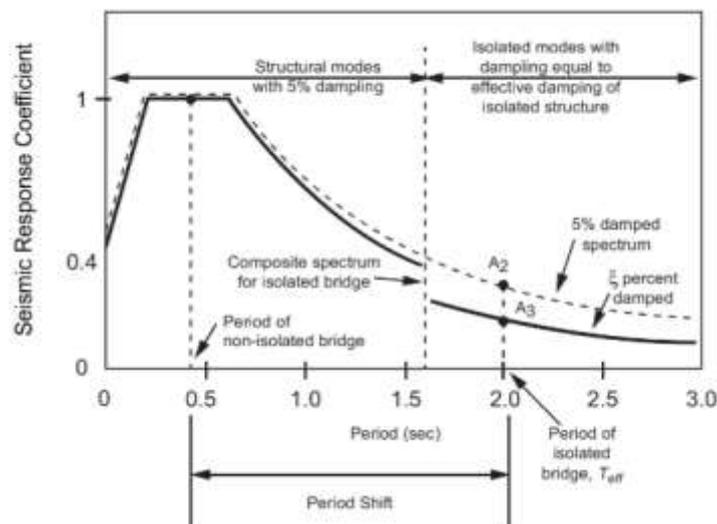
Así mismo, para el diseño del aislador con núcleo de plomo (LRB), es fundamental conocer las partes que lo componen (ver figura N°07):

Espectro de respuesta para diseño de Aislador

Debido al incremento de la fracción de amortiguamiento con la incorporación de aisladores sísmicos, se puede reducir el espectro de diseño, de acuerdo a la figura 21. El procedimiento para lograr el espectro de diseño es dividiendo el espectro original entre el coeficiente de amortiguamiento para el rango de período largo del espectro de respuesta de diseño (B_L). El factor de modificación de respuesta (R), que se utilizará para el diseño sísmico del aislador LRB será igual a la unidad ($R=1$), ya que se busca un adecuado comportamiento de respuesta ante eventos sísmicos considerables

Figura 21

Reducir el espectro de diseño



Nota. Por AASHTO, 2014

Partiendo del espectro de diseño para el puente Moyocc se tiene un $B_L = 1.625$ para una fracción de amortiguamiento de 25% y con factor de modificación de repuesta ($R=1$), se tiene el siguiente espectro para el aislador

Figura 22

Espectro de diseño para el aislador sísmico



Desplazamientos de diseño:

Para el desplazamiento de diseño de la superestructura, se debe tener en cuenta que la variable B_L , depende a su vez de la relación equivalente de amortiguamiento viscoso (ξ). Será necesario obtener dichas variables para que el cálculo de desplazamiento de diseño refleje valores lo más reales posibles. El desplazamiento de diseño se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$D_D = \left(\frac{g}{4 \times \pi^2} \right) \left(\frac{S_{D1} \times T_{eff}}{B_L} \right)$$

Donde:

B_L : Coeficiente de amortiguamiento para el rango de período largo del espectro de respuesta de diseño

S_{D1} : Coeficiente de aceleración espectral de respuesta horizontal en el período 1,0 modificado por el factor de sitio de período largo

Para el cálculo de B_L se tiene la siguiente ecuación:

$$B_L = \left(\frac{\xi}{0.05} \right)^{0.3}$$

Para una relación equivalente de amortiguamiento viscoso (ξ) de 25% se tiene lo siguiente:

$$B_L = \left(\frac{0.25}{0.05} \right)^{0.3} = 1.625$$

Reemplazando la ecuación se tiene el siguiente desplazamiento de diseño:

$$D_D = \left(\frac{9.81 \frac{m}{s^2}}{4 \times \pi^2} \right) \left(\frac{0.623 \times 1.50}{1.625} \right) = 14.29 \text{ cm}$$

El el cálculo del periodo efectivo (T_{eff}) del sistema se puede usar la la siguiente ecuacion:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}}$$

Geometría del aislador

Cálculo de la rigidez de diseño mínimo del sistema (DBE)

Para la obtención de la Rigidez de diseño mínimo del sistema se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_{D \text{ min total}} = \frac{4\pi^2 \times W}{T_{eff}^2 \times g}$$

Reemplazando la ecuacion se tiene lo siguiente:

$$K_{D \text{ min total}} = \frac{4\pi^2 \times 135 \text{ tnf}}{1.50^2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} = 241.46 \frac{\text{tnf}}{m}$$

Cálculo de la rigidez de diseño máximo del sistema (MCE)

Para la obtención de la rigidez de diseño máximo del sistema se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_{D \text{ máx total}} = 1.1 \times K_{D \text{ min total}}$$

Reemplazando la ecuacion se tiene lo siguiente:

$$K_{D \text{ máx total}} = 1.1 \times 241.46 \frac{\text{tnf}}{m} = 265.61 \frac{\text{tnf}}{m}$$

Cálculo de la rigidez de diseño mínimo para cada aislador (MCE)

$$K_{D \text{ min}} = \frac{K_{D \text{ min total}}}{N}$$

Reemplazando la ecuacion, considerando 12 apoyos (aisladores) se tiene lo siguiente:

$$K_{D \text{ min}} = \frac{241.46 \frac{\text{tnf}}{m}}{1.00} = 241.46 \frac{\text{tnf}}{m}$$

Cálculo de la mínima rigidez para el sismo máximo

$$K_{M \text{ mín total}} = \frac{4\pi^2 \times W}{T_m^2 \times g}$$

Reemplazando la ecuación se tiene lo siguiente:

$$K_{M \text{ mín total}} = \frac{4\pi^2 \times 249.83}{1.50^2 \times 9.81} = 142.23 \frac{\text{Tnf}}{\text{m}}$$

Cálculo de la fuerza de desplazamiento nulo (Q_d)

La fuerza de desplazamiento nulo Q_d se determina con la siguiente relación:

$$Q_d = K_{D \text{ mín}}$$

$$K_{D \text{ mín}} = \frac{2Q_d \times \left(D_D - \frac{Q_d}{(\psi - 1) \left(K_{D \text{ mín}} - \frac{Q_d}{D_D} \right)} \right)}{\pi \times \beta_D \times D_D^2}$$

Reemplazados valores de los datos del Aislador, se tiene lo siguiente:

$$241.46 = \frac{2Q_d \times \left(14.29 - \frac{Q_d}{(6.4 - 1) \left(241.46 - \frac{Q_d}{14.29} \right)} \right)}{\pi \times 0.25 \times 14.29^2}$$

$$Q_d = 16.16 \text{ tnf}$$

Área del núcleo del plomo (A_{pb})

Para el cálculo del área de plomo se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_{pb} = \frac{Q}{f_{ypb}}$$

Reemplazados valores de los datos del Aislador, se tiene lo siguiente:

$$A_{pb} = \frac{16160 \text{ kgf}}{90 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 179.56 \text{ cm}^2$$

Cálculo del diámetro del plomo (d_{pb})

$$d_{pb} = \sqrt{4 \times \frac{A_{pb}}{\pi}}$$

Reemplazados valores de los datos del aislador, se tiene lo siguiente:

$$d_{pb} = \sqrt{4 \times \frac{179.56}{\pi}} \cong 15.00 \text{ cm}$$

Recálculo del del área del núcleo del plomo (A_{pb})

$$A_{pb} = \frac{\pi}{4} \times d_{pb}^2 = 176.71 \text{ cm}^2$$

Cálculo de la fuerza de deformación nula del plomo (Q_{pb})

Para el cálculo de la fuerza de deformación nula del plomo se utiliza la siguiente ecuación

$$Q_{pb} = A_{pb} \times f_{ypb}$$

Reemplazados valores de los datos del plomo, se tiene lo siguiente:

$$Q_{pb} = 176.71 \text{ cm}^2 \times 90 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 15.90 \text{ tnf}$$

Área del aislador-caucho (Q_{pb})

Para el cálculo de área del aislador-caucho se utiliza la siguiente ecuación

$$A = \frac{P}{\sigma_{cr \text{ Máx}}}$$

Reemplazando valores de los datos del caucho, se tiene lo siguiente:

$$A = \frac{134.00 \text{ tnf}}{90.00 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 1488.90 \text{ cm}^2$$

Diámetro del aislador (D_e)

Para el cálculo del aislador elastomérico, se utiliza la siguiente ecuación

$$D_e = \sqrt{4 \times \frac{A}{\pi} + d_{pb}^2}$$

Reemplazando valores de los datos del plomo, se tiene lo siguiente:

$$D_e = \sqrt{4 \times \frac{1488.90 \text{ cm}^2}{\pi} + 15.0^2} = 46.05 \text{ cm} \cong 50 \text{ cm}$$

Recálculo del área de aislador

Debido a los nuevos valores del diámetro del aislador, se realiza el recalcu del área del aislador elastomérico, para ello se utiliza la siguiente ecuación

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D_e^2 - D_{pb}^2)$$

Reemplazando valores del diámetro del aislador y diámetro del plomo, se tiene lo siguiente:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (50.0^2 - 15.0^2) = 1786.78 \text{ cm}^2$$

Verificación del diámetro del plomo

El diámetro del plomo debe estar en el intervalo de los siguientes valores:

$$\frac{D_e}{6} \leq d_{pb} \leq \frac{D_e}{3}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$\frac{50}{6} \leq d_{pb} \leq \frac{50}{3} \rightarrow 8.33 \leq 15.00 \leq 16.66 \therefore \text{Cumple}$$

Cálculo de la rigidez Post Fluencia (K_p)

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_p = k_{Dmín} - \frac{Q}{D_D}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$K_p = 241.46 \frac{tnf}{m} - \frac{15.90 \text{ tnf}}{14.29 \text{ cm}} = 129.73 \frac{tnf}{m}$$

Cálculo de la altura total del Caucho (H_r)

Para el cálculo de altura, se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_r = \frac{GA}{K_p} \times f_L$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$H_r = \frac{4.589 \frac{kg}{cm^2} \times 1786.78 \text{ cm}^2}{129.73 \frac{tnf}{m}} \times 1.15 \cong 10.50 \text{ cm}$$

Número de capas de Caucho (n_r)

Para el cálculo de altura, se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_r = \frac{H_r}{t_r}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$n_r = \frac{10.50 \text{ cm}}{0.8 \text{ cm}} = 13.00$$

Nueva altura total del caucho (H_r)

Para el recálculo de la altura total del caucho hacemos uso de la siguiente ecuación

$$H_r = n_r \times t_r$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$H_r = 13 \times 0.80 \text{ cm} = 10.40 \text{ cm} \cong 10.50 \text{ cm}$$

Cálculo de la deformación unitaria cortante

Para el cálculo de deformación unitaria cortante, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\gamma_{ss} = \frac{D_D}{H_r}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

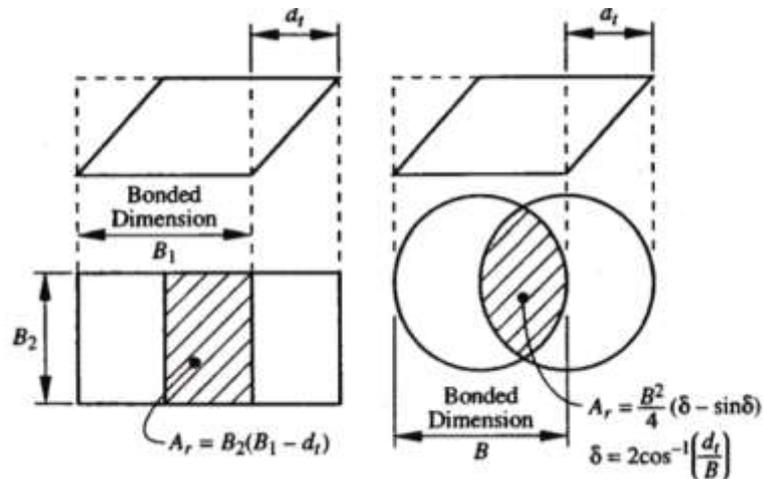
$$\gamma_{ss} = \frac{14.29}{10.50} = 1.36$$

Cálculo del área reducida debido a la deformación

Debido a la deformación del aislador elastomérico circular, se debe de considerar un área reducida, de acuerdo a los requerimientos establecidos en la siguiente figura

Figura 23

Área reducida debido a la deformación



Nota. Por AASHTO, 2014

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{D_D}{D_e} \right)$$

Reemplazando valores en el sistema radian, se tiene lo siguiente:

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{14.29}{50.00} \right) = 2.56$$

Para calcular el área reducida del aislador utilizamos la siguiente ecuación:

$$A_r = \frac{D_e^2}{4} \times (\delta - \sin(\delta))$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$A_r = \frac{50.00^2}{4} \times (2.56 - \sin(2.56)) = 1256.65 \text{ cm}^2$$

Porcentaje de Área Reducida:

$$A_{AR} = \frac{A_r}{A} \%$$

$$A_{AR} = \frac{1256.65 \text{ cm}^2}{1786.78 \text{ cm}^2} \times 100 = 70.33\%$$

Verificación del espesor de la lámina de acero

Para la verificación de las láminas de acero se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{3 \times t_r}{1.08 \times f_{ys} \times \frac{A_r}{P_u} - 2}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$t_s = \frac{3 \times 0.80 \text{ cm}}{1.08 \times 2400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times \frac{1256.65 \text{ cm}^2}{249.83 \text{ tnf}} - 2} = 2.17 \text{ mm}$$

El espesor de la plancha de acero debe estar en el siguiente intervalo:

$$1.5 \text{ mm} \leq t_s \leq 4.0 \text{ mm} \quad \therefore t_s = 4 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el espesor de las planchas de acero para el aislador LRB es $t_s = 4 \text{ mm}$

Número de láminas de acero:

El número de láminas de acero resulta de la diferencia en la unidad al número de capas de caucho, de acuerdo a la siguiente ecuación

$$n_s = n_r - 1$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$n_s = 13.00 - 1.00 = 12.00$$

Esfuerzo de compresión en las láminas de acero:

Para el cálculo del esfuerzo de compresión de las láminas de acero, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Cs} = 1.5 \times \frac{t_r}{t_s} \times \sigma_{Cs}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{Cs} = 1.5 \times \frac{0.8 \text{ cm}}{0.4 \text{ cm}} \times 90 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 270.00 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Verificación de los esfuerzos por compresión en las láminas de acero:

Para la verificación del esfuerzo de compresión, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Cs} \leq 0.75 f_{ys}$$

$$270.00 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.75 \times 2400 \frac{kg}{cm^2}$$

$$270.00 \frac{kgf}{cm^2} \leq 1800 \frac{kg}{cm^2} \quad \therefore \text{Cumple}$$

Altura neta del aislador de acero:

Para determinar la altura neta del aislador se debe sumar todos los espesores del caucho, acero, planchas internas y planchas de soporte, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$H = H_r + (n_r - 1) \times t_s + 2t_{ip}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$H = 10.5 + (13 - 1) \times 0.4 + 2 \times 2 = 20.00 \text{ cm}$$

Altura total del aislador más placas de soporte:

$$H_T = H_r + (n_r - 1) \times t_s + 2t_{ip} + 2t_{ext}$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$H_T = 19.30 \text{ cm} + 2 \times 2.5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$$

Verificación final del diámetro de núcleo de plomo:

Para la verificación final del diámetro del núcleo del plomo se utiliza la siguiente ecuación

$$1.25 \leq \frac{H}{D_{pb}} \leq 5$$

Reemplazando valores, se tiene lo siguiente:

$$1.25 \leq \frac{20}{15} \leq 5 \rightarrow 1.25 \leq 1.30 \leq 5 \quad \therefore \text{Cumple}$$

A continuación, se muestra el cuadro de resumen de las dimensiones del aislador con núcleo de plomo LRB obtenidos del método elástico simplificado:

Tabla 18

Dimensiones del aislador con núcleo de plomo

| Resumen de las propiedades geométricas Aislador LRB | | |
|--|----------------|----------------------|
| Descripción | Símbolo | Longitud (cm) |
| Diámetro del núcleo de plomo | d_L | 15.00 |

| | | |
|---|-----------|-------|
| Diámetro del Aislador | D_e | 50.00 |
| Espesor de Caucho | t_r | 0.80 |
| Recubrimiento de caucho | r_c | 2.50 |
| Numero de láminas de Caucho | n_r | 13.00 |
| Altura de Aislador | H | 20.00 |
| Espesor de láminas de acero | t_s | 0.40 |
| Espesor de lámina de acero de soporte interior | t_{ip} | 2.00 |
| Espesor de lámina de acero de soporte exterior | t_{ext} | 2.50 |

Debido que en la actualidad hay una amplia gama de aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo que son comerciales y teniendo el dimensionamiento preliminar del aislador LRB para el puente Moyoc, se puede acceder a un producto con características geométricas parecidas a las obtenidas.

Selección del aislador LRB

Del catálogo de aisladores comercializados en el mercado internacional para puentes, se selecciona el de tipo LRB-500-SM-105/80, la primera letra corresponde al tipo de aislador (elastomérico con núcleo de plomo), el segundo, diámetro del aislador en mm, tipo de elastómero (S-N-H), grado de deformación del elastómero (M-H), altura del elastómero en mm y el diámetro de plomo en mm respectivamente. A continuación, se muestra el cuadro de resumen de las propiedades mecánicas del aislador:

Tabla 19

Propiedades mecánicas del aislador LRB

| Aislador Elastomérico con núcleo de plomo | | | |
|--|----------------|---------------|--------------|
| Descripción | Símbolo | Unidad | Valor |
| Diámetro del caucho | D_e | mm | 500 |
| Diámetro del plomo | d_{pb} | mm | 80.00 |
| Altura Total | H_T | mm | 207 |
| Tamaño de chapa general | $L \times L$ | mm x mm | 550 x 550 |
| Espesor Total del caucho | H_r | mm | 105 |

| | | | |
|--|---------------|-------|--------|
| Factor de forma | S | - | 17.00 |
| Rigidez Vertical | K_v | KN/mm | 668.00 |
| Rigidez horizontal efectiva | K_{eff} | KN/mm | 1.20 |
| Amortiguación efectiva | ξ_{eff} | % | 25.00 |
| Desplazamiento de deformación | d_y | mm | 9.00 |
| Carga de Deformación Horizontal | F_y | KN | 63.00 |
| Desplazamiento de Diseño Horizontal | d_d | mm | 113 |
| Carga de Diseño Horizontal | H_{db} | KN | 505 |
| Carga Estática Vertical máxima | N_{SLU} | KN | 2450 |
| Carga Sísmica Vertical máxima | $N_{SEISMIC}$ | KN | 1600 |
| Módulo de corte del caucho | G | MPa | 0.40 |

Factores de modificación (λ)

En el cálculo de las propiedades mecánicas del aislado se deberá de tomar en cuenta el efecto de la temperatura (λ_t), efecto de envejecimiento (λ_a), efecto de desgaste (λ_{tr}), velocidad de desplazamiento (λ_v), efecto de fricción (λ_{scragg}), contaminación (λ_c). Los factores de modificación influyen en la rigidez post fluencia ($K_p = K_d$) y en la fuerza para el desplazamiento nulo (Q_d). De acuerdo a la siguientes los cuales están establecidas en la guía de especificaciones para diseño sísmico de aislador:

$$K_{d,m\acute{a}x} = K_d \times \lambda_{max,Kd}$$

$$K_{d,m\acute{i}n} = K_d \times \lambda_{min,Kd}$$

$$Q_{d,m\acute{a}x} = Q_d \times \lambda_{m\acute{a}x,Qd}$$

$$Q_{d,m\acute{i}n} = Q_d \times \lambda_{m\acute{i}n,Qd}$$

Los factores máximos y mínimos de modificación del sistema se terminan con las siguientes ecuaciones que se muestran en la figura 24:

Figura 24

Factores máximo y mínimos de modificación del sistema

$$\lambda_{min,Kd} = \frac{(\lambda_{min,t,Kd}) (\lambda_{min,a,Kd}) (\lambda_{min,v,Kd}) (\lambda_{min,tr,Kd})}{(\lambda_{min,c,Kd}) (\lambda_{min,scrag,Kd})} \quad (8.2.1-1)$$

$$\lambda_{max,Kd} = \frac{(\lambda_{max,t,Kd}) (\lambda_{max,a,Kd}) (\lambda_{max,v,Kd}) (\lambda_{max,tr,Kd})}{(\lambda_{max,c,Kd}) (\lambda_{max,scrag,Kd})} \quad (8.2.1-2)$$

$$\lambda_{min,Qd} = \frac{(\lambda_{min,t,Qd}) (\lambda_{min,a,Qd}) (\lambda_{min,v,Qd}) (\lambda_{min,tr,Qd})}{(\lambda_{min,c,Qd}) (\lambda_{min,scrag,Qd})} \quad (8.2.1-3)$$

$$\lambda_{min,Qd} = \frac{(\lambda_{min,t,Qd}) (\lambda_{min,a,Qd}) (\lambda_{min,v,Qd}) (\lambda_{min,tr,Qd})}{(\lambda_{min,c,Qd}) (\lambda_{min,scrag,Qd})} \quad (8.2.1-4)$$

Nota. Por AASHTO, 2014

Recalculo de parámetros del aislador LRB para el modelo bilineal

Rigidez elástica (K_e)

Para el cálculo de la rigidez elástica, se utiliza la siguiente relación:

$$K_e = \frac{F_y}{d_y} = \frac{6.424 \text{ tnf}}{9 \times 10^{-3} \text{ m}} = 713.78 \frac{\text{tnf}}{\text{m}}$$

Área total del aislador (A)

De acuerdo a lo mostrado en la sección 5.6.12 se tiene la siguiente área:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (50.0^2 - 8.0^2) = 1913.23 \text{ cm}^2$$

Rigidez post fluencia (K_p)

De acuerdo a lo mostrado en la sección 5.6.15 se tiene la siguiente rigidez de post fluencia

$$K_p = \frac{GA}{H_r} \times F_L = \frac{4.078 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \times 1913.23 \text{ cm}^2}{10.5 \text{ cm}} \times 1.5 = 111.48 \frac{\text{tnf}}{\text{m}}$$

Amortiguamiento efectivo (K_p)-Effective Damping

Para el amortiguamiento efectivo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = 2 \times \beta_{eff} \times \sqrt{K_{eff} \times \frac{W}{g}}$$

Reemplazados valores, se obtiene: $C = 20.44 \frac{\text{tnf} \cdot \text{seg}}{\text{m}}$

Relación (K_p/K_e)-post yield stiffness ratio

La relación K_p/K_e , reemplazado valores resulta ser igual a 0.156

Parámetros para el modelo Bilineal y modelado de aislador LRB en CSI Bridge

Propiedades en la dirección U_1 (Dirección Vertical)

- Propiedades lineales

$$K_v = 68117.04 \frac{tnf}{m}$$

- Propiedades No Lineales

$$K_v = 68117.04 \frac{tnf}{m}$$

Propiedades en la dirección U_2 (Dirección X)

- Propiedades lineales

$$K_{eff} = 122.36 \frac{tnf}{m} \rightarrow \text{Rigidez efectiva (Effective Stiffness)}$$

$$C = 20.45 \frac{tnf \cdot s}{m} \rightarrow \text{Amortiguamiento Efectivo (Effective Damping)}.$$

- Propiedades No Lineales

$$K_e = 713.78 \frac{tnf}{m} \rightarrow \text{Rigidez Elástica (Stiffness)}$$

$$F_y = 6.42 \text{ tnf} \rightarrow \text{Fuerza de fluencia (Yield Strength):}$$

$$\frac{K_p}{K_e} = 0.156 \rightarrow \text{Relacione de rigideces (post fluencia y elastica)}$$

Propiedades en la dirección U_3 (Dirección Y)

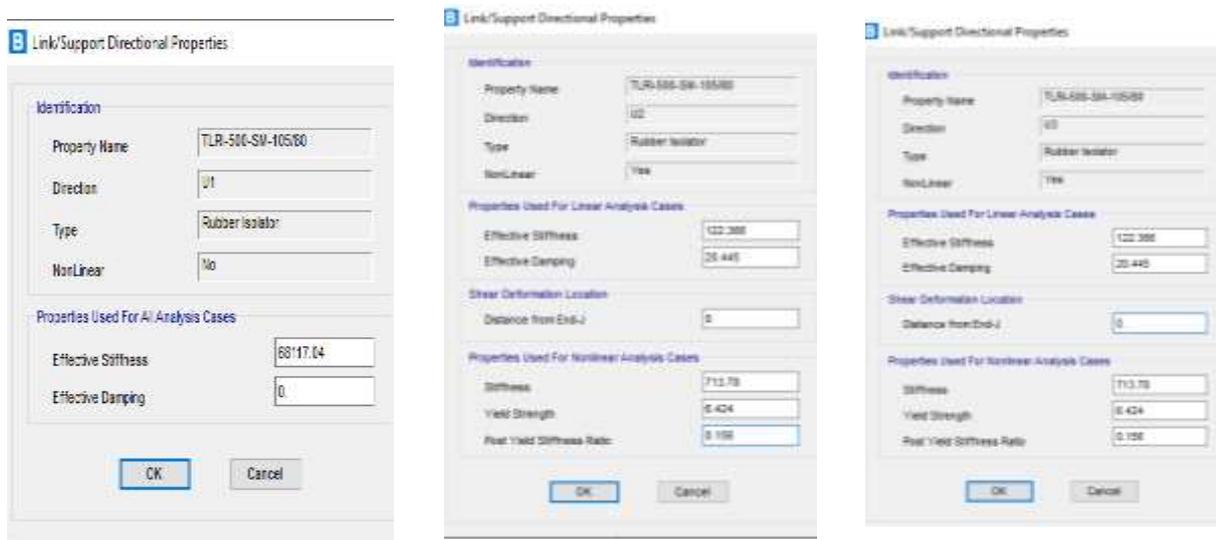
- Las propiedades lineales y no lineales son las mismas consideradas para la dirección U_2 , debido a que se está considerando una geometría circular del aislador LRB

Ingreso de datos en el programa CSI Bridge

El programa requiere de las propiedades lineales y no lineales del aislador en las direcciones U_1, U_2, U_3 . Tal como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 25

Dirección U1; U2; U3



Nota. (a) Dirección U1; (b) Dirección U2; (c) Dirección U3. Elaborado con CSI Bridge V25 2023.

RESULTADOS CONSIDERANDO AISLADOR SISMICO LRB

Período de Vibración

Tabla 20

Período de vibración

| Periodo de Vibración (Con Aislamiento LRB) | |
|---|----------------------|
| Modo | Periodo (seg) |
| 1 | 1.652 |
| 2 | 1.432 |

Cortante en la base debido a sismo

Tabla 21

Cortante en la base debido a sismo

| Apoyos con aislador sísmico LRB | | | |
|--|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Descripción | Dirección | Cortante (Tnf) | Momento ($Tnf.m$) |

| | | | |
|------------------|-----|--------|---------|
| SISMO X-X | X-X | 207.85 | 99.28 |
| | Y-Y | 54.51 | 630.64 |
| | Z-Z | 2.44 | 2509.66 |
| SISMO Y-Y | Y-Y | 62.36 | 330.92 |
| | X-X | 181.71 | 302.32 |
| | Z-Z | 5.37 | 8365.49 |

Desplazamiento en los aisladores LRB debido a cargas de sismo

Desplazamientos en la dirección X

En la siguiente tabla se muestra los desplazamientos en los apoyos de la superestructura considerando apoyos móviles sobre los estribos (derecho e izquierdo) y apoyos fijos en la pila central. Debido a la carga lateral sísmica en la dirección X

Tabla 22

Desplazamiento en apoyos con aislador LRB, debido a la carga lateral sísmica en la dirección X

| DEZPLAZAMIENTOS EN LOS AISLADORES | | | | | |
|--|-------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| N° DE ASILADOR | LINK | CASO DE CARGA | U1 | U2 | U3 |
| | | | cm | cm | cm |
| 1 | 1 | TH PISCO UX | -0.076 | -0.013 | 3.980 |
| 2 | 2 | TH PISCO UX | -0.077 | 0.001 | 3.978 |
| 3 | 3 | TH PISCO UX | -0.076 | 0.015 | 3.980 |
| 4 | 49 | TH PISCO UX | -0.076 | -0.013 | 5.364 |
| 5 | 50 | TH PISCO UX | -0.077 | 0.000 | 5.366 |
| 6 | 51 | TH PISCO UX | -0.076 | 0.014 | 5.364 |
| 7 | 59 | TH PISCO UX | -0.073 | 0.026 | 5.094 |
| 8 | 62 | TH PISCO UX | -0.075 | 0.034 | 3.706 |
| 9 | 65 | TH PISCO UX | -0.084 | 0.000 | 5.112 |
| 10 | 68 | TH PISCO UX | -0.081 | 0.000 | 3.704 |
| 11 | 71 | TH PISCO UX | -0.073 | -0.023 | 5.094 |
| 12 | 74 | TH PISCO UX | -0.075 | -0.031 | 3.706 |

Desplazamientos en la dirección Y

En la siguiente tabla se muestra los desplazamientos en los apoyos de la superestructura considerando apoyos móviles sobre los estribos (derecho e izquierdo) y apoyos fijos en la pila central. Debido a la carga lateral sísmica en la dirección Y

Tabla 23

Desplazamiento en apoyos con aislador LRB, debido a la carga lateral sísmica en la dirección Y

| DEZPLAZAMIENTOS EN LOS AISLADORES | | | | | |
|--|-------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| N° de Aislador | Link | Caso de carga | U1 | U2 | U3 |
| | | | cm | cm | cm |
| 1.0 | 1.0 | TH PISCO UY | -0.084166 | -4.440903 | -0.825662 |
| 2.0 | 2.0 | TH PISCO UY | -0.078639 | -4.650538 | -0.754969 |
| 3.0 | 3.0 | TH PISCO UY | -0.084939 | -4.412611 | -0.819385 |
| 4.0 | 49.0 | TH PISCO UY | -0.084172 | -4.198876 | 0.645107 |
| 5.0 | 50.0 | TH PISCO UY | -0.078642 | -4.378092 | 0.687895 |
| 6.0 | 51.0 | TH PISCO UY | -0.085029 | -4.172854 | 0.642319 |
| 7.0 | 59.0 | TH PISCO UY | -0.085623 | -3.917184 | 0.566837 |
| 8.0 | 62.0 | TH PISCO UY | -0.087006 | -4.053998 | -0.736426 |
| 9.0 | 65.0 | TH PISCO UY | -0.086246 | -3.956771 | 0.640491 |
| 10.0 | 68.0 | TH PISCO UY | -0.082449 | -4.286543 | -0.701735 |
| 11.0 | 71.0 | TH PISCO UY | -0.086628 | -3.966364 | 0.575128 |
| 12.0 | 71.0 | TH PISCO UY | -0.08814 | -4.118481 | -0.742023 |

VERIFICACIONES DEL AISLADOR SISMICOCO LRB

En este capítulo se realiza a verificación del aislador sísmico LRB debido a las diferentes sollicitaciones sísmicas. Las verificaciones al aislador LRB son las siguientes:

Verificación de la frecuencia vertical:

Cálculo del factor de Forma:

Para el cálculo del factor de forma se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_s = \frac{(D_e - d_{pb})}{4 \times t_r}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene los siguiente $S_s = 17.0$

Verificación del factor de forma:

El factor de forma del aislador deberá ser mayor a 10

$$S_s \geq 10 \rightarrow 17 \geq 10 \quad \therefore \text{Cumple}$$

Cálculo del módulo de elasticidad a compresión del conjunto Acero-Caucho:

Para el cálculo del módulo de elasticidad en conjunto, se utilizará la siguiente

$$E_c = \left(\frac{1}{6 \times G \times S_s^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$E_c = 4836.48 \frac{kg}{cm^2} \cong 474.29 \text{ Mpa}$$

Verificación de la relación entre rigidez vertical y rigidez horizontal:

La rigidez horizontal es un dato del fabricante del aislador

$$K_H = 122.37 \frac{tnf}{m}$$

La rigidez vertical del aislador se puede determinar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$K_V = \frac{E_c \times A}{H_r} + \frac{E_{pb} \times A_{pb}}{H}; \text{ Reemplazando valores se obtiene } K_V = 140629.95 \frac{tnf}{m}$$

Se puede apreciar que existe una diferencia de la rigidez vertical proporcionada por el fabricante y la calculada, para el diseño se tomará en cuenta el $K_V = 68117.04 \frac{tnf}{m}$ del fabricante.

La relación de rigidez vertical y horizontal deberá ser mayor al siguiente valor:

$$\frac{K_V}{K_H} \geq 400 \rightarrow 556.60 \geq 400 \quad \therefore \text{cumple}$$

Verificación a deformación unitaria cortante por compresión

Deformación unitaria cortante por compresión

$$\varepsilon_c = \frac{P}{E_c \times A}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$\varepsilon_c = 0.014$$

$$\gamma_c = 6 \times S_s \times \varepsilon_c \rightarrow \therefore \gamma_c = 1.43$$

Verificación por deformación unitaria cortante por compresión

Se debe de cumplir con lo siguiente

$$\gamma_c \leq \frac{\varepsilon_u}{3} \rightarrow 1.43 \leq 2.17 \quad \therefore \text{Cumple}$$

Verificación a Pandeo

Área de corte efectiva

$$A_s = A \times \gamma_s$$

Donde:

γ_s : Deformación unitaria cortante de diseño, reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$A_s = 1913.23 \text{ cm}^2 \times 4.5 = 8609.54 \text{ cm}^2$$

Fuerza de corte efectivo (P_s)

La fuerza de corte sobre el aislador se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$P_s = G \times A_s$$

Reemplazando valores en la ecuación: $G = 4.079 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; $A_s = 8609.54 \text{ cm}^2$; $P_s = 35.12 \text{ tn}$

Inercia del aislador

Para el cálculo de la inercia, utilizamos la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{4} \times \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_{pb}}{2} \right)^4 \right)$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$I = 306595.10 \text{ cm}^4$$

Cálculo de rigidez de giro (K_θ)

Para el cálculo de la rigidez de giro se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$K_\theta = \frac{E_c \times I}{H_r}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $K_\theta = 1412.23 \text{ tnf} \cdot \text{m}$

Cálculo de la rigidez de diseño (K_d)

Para determinar la rigidez de diseño, se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_d = \frac{K_p}{f_L}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $K_d = 74.32 \frac{tnf}{m}$

Cálculo de carga crítica de pandeo de Euler

Para el cálculo de la carga axial sobre aislador se utiliza la siguiente ecuación

$$P_{axial} = \pi \times \sqrt{K_d \times K_\theta}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $P_{axial} = 1017.78 \text{ tnf}$

Cálculo de la carga crítica para pandeo

Para el cálculo de la carga crítica para pandeo utilizamos la siguiente ecuación

$$P_{cr} = \frac{A_R}{A_{gross}} \times P_{axial}$$

Utilizando las ecuaciones de la sección 5.6.19, para un $d_t = 10.46 \text{ cm}$, se tiene:

$$A_R = 1444.24 \text{ cm}^2$$

Reemplazando valores en la ecuación para determinar la carga crítica para pandeo se tiene:

$$P_{cr} = 748.62 \text{ tnf}$$

Verificación de Pandeo por Carga Axial

Para la carga axial, el factor de seguridad (F.S) deberá ser mayor o igual a 3

$$FS = \frac{P_{cr}}{P_{SE}} \geq 3$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $FS = 4.59$

$$FS \geq 3 \quad \therefore \text{Cumple}$$

Verificación de pandeo por carga axial última

Para la carga axial última, el factor de seguridad (F.S) deberá ser mayor o igual a la unidad

$$FS = \frac{P_{cr}}{P_u} \geq 1$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $FS = 2.99$

$$FS \geq 1 \quad \therefore \text{Cumple}$$

Verificación de deformación del caucho por cortante sísmico en la dirección X

La verificación de deformación del caucho se realiza para estado deformado del aislador

$$\gamma_D + \gamma_C + 0.5 \times \gamma_\theta \leq 5.5$$

Donde:

γ_D : Deformación de cortante generada por desplazamiento de cortante

γ_C : Deformación de cortante generada por carga axial

γ_θ : Deformación de cortante debido a la rotación angular

Deformación de cortante generada por desplazamiento de cortante

$$\gamma_D = \frac{d_t}{H_r}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene: $\gamma_D = 0.996$

Deformación de cortante generada por carga axial

Para el estado deformado del aislador LRB se tiene lo siguiente

$$\gamma_C = \frac{6 \times P_{SE} \times S_s}{E_c \times A_R}$$

Donde:

$$S_s = \frac{A}{\pi \times D_e \times t_r} = \frac{1913.23 \text{ cm}^2}{\pi \times 50 \text{ cm} \times 0.8 \text{ cm}} = 15.23$$

$$E_c = 4 \times G_r \times (1 + 2S_s^2) = 7.59 \frac{\text{tnf}}{\text{cm}^2}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente: $\gamma_C = 1.12$

Deformación de cortante debido a la rotación angular

$$\gamma_\theta = \frac{0.375 \times D_e^2 \times \theta}{t_r \times H_r} \rightarrow \theta = 0.01 \text{ (en Radianes)}$$

Reemplazando valores en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$\gamma_{\theta} = 1.12$$

Finalmente, reemplazando los valores obtenidos en la ecuación de condición, se tiene lo siguiente:

$$\gamma_D + \gamma_C + 0.5 \times \gamma_{\theta} \leq 5.5$$

$$0.996 + 1.120 + 0.5 \times 1.12 \leq 5.5$$

$$2.68 \leq 5.5 \rightarrow \therefore \text{Cumple}$$

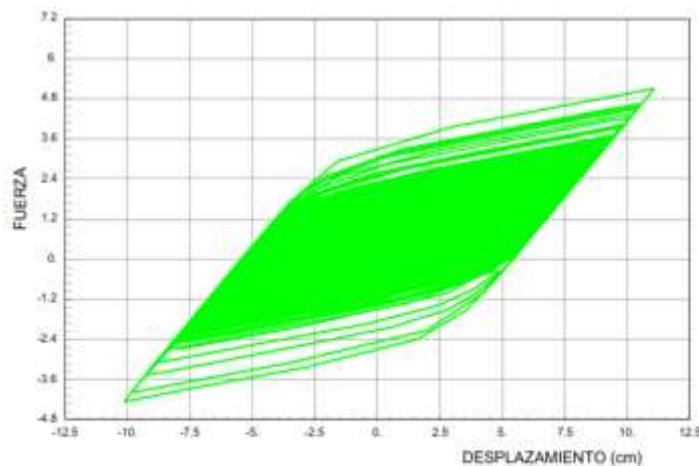
Por lo tanto, el aislador sísmico LRB seleccionado cumple con los requerimientos exigidos para el aislamiento sísmico de puentes

DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DEL AISLADOR LRB

Se muestra el diagrama de comportamiento histerético para el aislador LRB con código LINK 71 y 65 debido a la acción dinámica del sismo de diseño. Se infiere un desplazamiento máximo de 11.00 cm en la dirección Ux debido a una fuerza máxima 5.0 *tnf*. Los diagramas de comportamiento histerético son parecidas

Figura 26

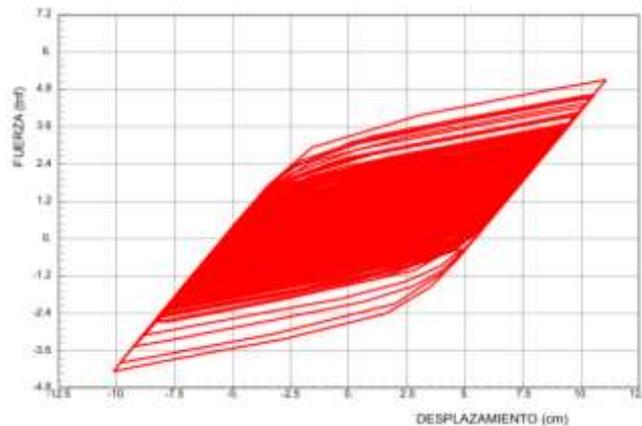
Diagrama de histéresis del comportamiento del aislador LRB LINK 71 (sobre el pilar)



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

Figura 27

Diagrama de histéresis del comportamiento del aislador LRB LINK 65 sobre el pilar



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

1 CONCLUSIONES

- El espectro de diseño del puente Moyocc fue elaborado de acuerdo a los requerimientos de la normativa AASHTO LRFD 2014, la guía de especificaciones para el diseño de aisladores sísmicos de AASHTO 2014 y el manual de puentes del Perú 2016; para un periodo de retorno (T_r) de 1000 años.
- En el espectro para el diseño del aislador (figura 22) la aceleración correspondiente para un periodo de $T= 0.5115$ segundos es de 1.11 g (unidad de la gravedad en m/s^2), el cual resulta de considerar apoyos convencionales en la superestructura. La aceleración para un periodo de $T= 1.652$ segundos (considerados aisladores en los apoyos de la superestructura) es de 0.23 g. Habiendo una reducción significativa de la aceleración en un 79.30% respecto a la aceleración del modelo con apoyo convencional
- El periodo fundamental de vibración de la superestructura de puente Moyocc de acuerdo al análisis multimodal espectral y considerando apoyos convencionales (apoyo fijo) en la base de la superestructura, resulto $T= 0.5115$ segundos. Con la incorporación de los aisladores sísmicos de tipo LRB en la base de la superestructura, el periodo fundamental se incrementó a $T=1.652$ segundos. Habiendo una variación de periodos de 340%. Debido a esta variación la fuerza sísmica se verá reducida
- Se concluye que la fuerza sísmica que actúa en base (cortante en la base) considerando el aislador sísmico LRB, se redujo en un 82.28% con respecto modelo con apoyo

convencional en la base de la superestructura (apoyo móvil en los estribos y apoyo fijo en el pilar).

- Las verificaciones realizadas al aislador sísmico LRB para la estabilidad vertical y horizontal garantiza la funcionalidad y operatividad del aislador debido a eventos sísmicos considerables.
- El factor seguridad para el pandeo por carga axial del aislador ($FS > 3$) para el aislador LRB del puente Moyoc fue superior a los requerimientos de las normativas vigentes ($FS = 4.59$). Así mismo, el factor de seguridad para el pandeo por carga última del aislador ($FS > 1$) resultó ser mayor a los exigido ($FS = 2.99$)
- De acuerdo a las solicitaciones sísmicas para el puente Moyoc se ha determinado que el aislador con núcleo de plomo adecuado para garantizar la operatividad del puente tiene la siguiente característica: LRB-500-SM-105/80, aislador elastomérico circular con núcleo de plomo de 500 mm de diámetro, tipo de elastómero (S), grado de deformación del elastómero (M), altura del caucho de 105 mm y diámetro de del núcleo del plomo de 80 mm

2 RECOMENDACIONES

- En el diseño de aisladores sísmicos LRB alcanzar periodos de vibración mayores a 1.65 segundos. En el espectro de diseño para el aislador LRB para el puente Moyoc (figura 22) se observa una reducción de la aceleración considerable a partir de $T = 1.60$ segundos. Mientras el periodo sea ligeramente superior, la aceleración tornará a reducirse.
- Para la selección de aisladores sísmicos LRB para puentes, se debe tener en cuenta la rigidez horizontal, si se elige un aislador con rigidez alto, para garantizar las solicitaciones de cargas en estado de servicio o evento extremo, habrá un mínimo incremento del periodo de vibración ante cargas de sismo y casi nula reducción de la aceleración. Ya que, el conjunto superestructura -aislador interactúan de manera rígida. Es recomendable seleccionar un aislador flexible (rigidez baja) que pueda responder a las solicitaciones de cargas de manera eficiente para lograr el incremento de periodo de vibración y la reducción de la aceleración

3 REFERENCIAS

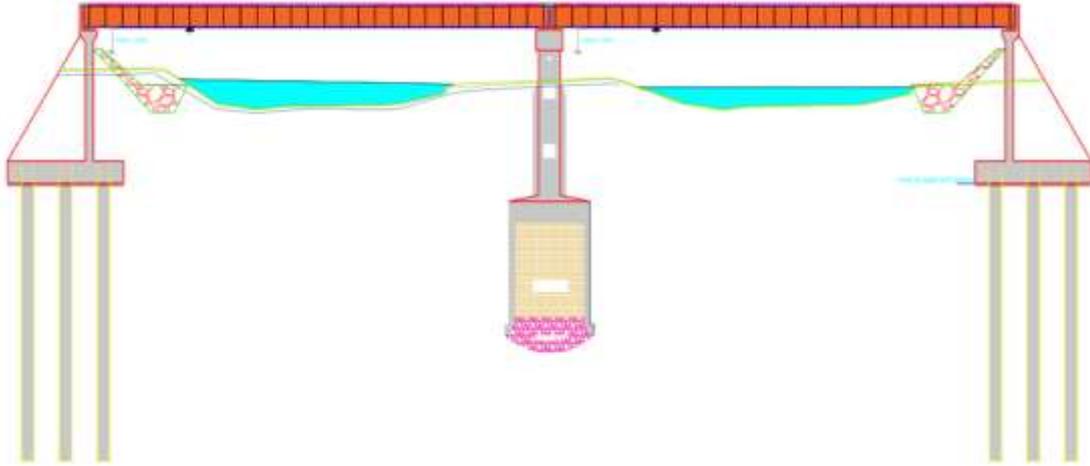
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Buckle I. et al (2006). *Seismic Isolation of Highway Bridges*. Unicerity at Buffalo, The State University of New York.
- Cheng, F. et al (2008). *Smart structures Innovative Systems for Seismic Response Control*. Taylor & Francis Group.
- Herrera, C. (2023). *Ventajas del uso de aisladores sísmicos mediante una comparación entre un puente con aislador sísmico y otro convencional tomando como referencia una alternativa al puente Dueñas*. [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24991>
- Instituto Geofísico del Perú. (2020). *Deformación cortical y potencial sísmico en la zona de subducción del Perú contribución a la geodesia*. Recuperado el 01 de setiembre del 2023, de https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//13937_deformacion-cortical-y-potencial-sismico-en-la-zona-de-subduccion-del-peru.pdf
- Kurniawan Santoso, A., Sulisty, D., Awaludin, A., Fajar Setiawan, A., Satyarno, I., Purnomo, S., & Harry, I. (2022). Structural Systems Comparison of Simply Supported PSC Box

- Girder Bridge Equipped with Elastomeric Rubber Bearing and Lead Rubber Bearing. *Dimensi Teknik Sipil*, 24(1), 19–30. <https://doi.org/10.9744/ced.24.1.19-30>
- Lama, L. & Vásquez, L. (2019). *Comparación de la respuesta sísmica de un puente diseñado con aisladores sísmicos, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS) aplicado al puente Riecito ubicado en el departamento de Piura*. [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2644>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Puentes*. Recuperado el 15 de Setiembre del 2023, de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_3%20PT-2016.pdf
- Páez, B. D. & Pérez, B. (2022). *Análisis del uso de aisladores sísmicos en el puente sobre el Río Caracol en el cantón Babahoyo*. [Tesis de licenciatura, Universidad Laica Vicente RocaFuerte de Guayaquil]. Repositorio Digital ULVR. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/5349>
- Rico Pradilla, L., & Chio Cho, G. (2012). Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. *Tecnura*, 16(34), 103–124. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a08>
- San Martín, L. (2022). *Estudio de las propiedades mecánicas y dinámicas de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en base a su dimensionamiento interno*. [Tesis de licenciatura, Universidad Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21492>

7. ANEXOS

Figura 28

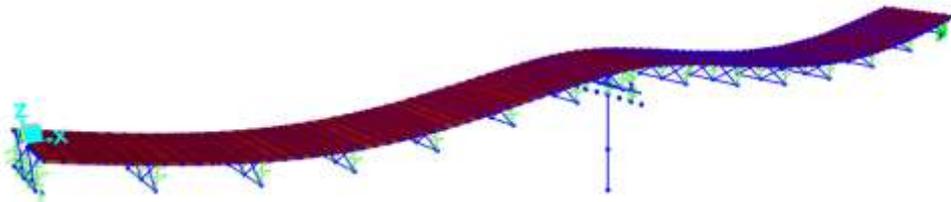
Vista General del puente Moyocc, el cual se encuentra constituido por una superestructura mixta de 02 tramos, 02 estribos en cada margen y 01 columna – pila centro



Nota. Adaptado de “Proyecto de Creación de Puente Vehicular sobre el río Moyocc del distrito de Cangallo, Provincia de Cangallo, Departamento de Ayacucho”, por Gobierno Regional de Ayacucho, 2020.

Figura 29

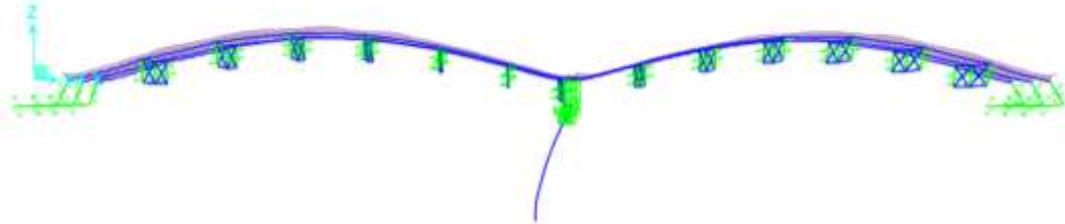
Envolvente de deformaciones en 3D



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

Figura 30

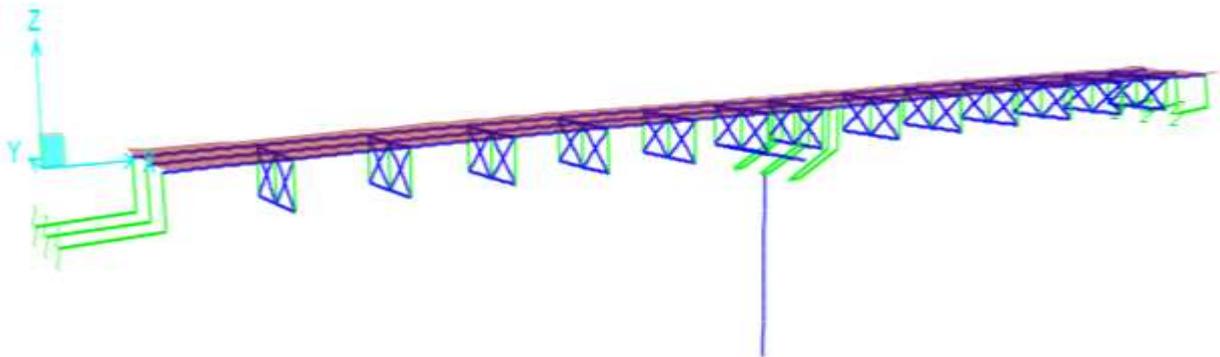
Modo de Vibración 1 considerando apoyos convencionales en la superestructura (apoyo móvil sobre los estribos y apoyo fijo sobre el pilar)



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023

Figura 31

Modo de Vibración 1 considerando aisladores sísmicos LRB sobre la superestructura del puente Moyoc



Nota. Elaborado con CSI Bridge V25 2023