



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Análisis estructural de un puente con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) en el Intercambio Vial Salcedo – Puno

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Civil

AUTOR:

Jimenez Condori, Juan Carlos (orcid.org/0000-0002-1868-1022)

ASESOR:

Mg. Barrantes Mann, Luis Alfonso Juan (orcid.org/0000-0002-2026-0411)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño Sísmico y Estructural

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA - PERU

2021

Dedicatoria

Doy gracias a Dios por darme salud para poder alcanzar mis metas.

A mis padres, Fredy y Adriana, por inculcarme valores morales y por estar siempre a mi lado para brindarme apoyo. Supieron guiarme por el buen camino ofreciéndome sabios consejos y estando a mi lado en todo momento.

Mis hermanos, Jordan, Yeni, Jessica y Zenayda, gracias por vuestra compañía y orientación.

Patrick Fernando y Carlos Enrique, mis hijos quienes me han servido de motivación e inspiración para crecer y poder brindarles un mejor futuro, y a mi esposa Milagros, quien es mi inspiración de vida.

Agradecimiento

Estoy agradecido a Dios por sus bendiciones, por ayudarme a llegar adonde estoy y por permitirme tener y apreciar a mi familia.

A mi compañera de vida, mi encantadora esposa Milagros, por inspirarme siempre a seguir adelante y no rendirme nunca, y a mis hijos que, gracias a ellos, me dan la fuerza para hacerlo y proporcionarles la mayor existencia posible.

A mis padres, que nunca me cuestionaron y siempre estuvieron a mi lado en todo, merecen elogios por su compromiso y apoyo inquebrantable en cada acción que emprendí.

A todas las personas que confiaron en mí, especialmente a mis hermanos, que siempre estuvieron a mi lado de alguna manera.

Índice de Contenidos

| | |
|--|------|
| Carátula..... | i |
| Dedicatoria | ii |
| Agradecimiento | iii |
| Índice de Contenidos..... | iv |
| Índice de Tablas | vi |
| Índice de Figuras..... | viii |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES..... | 4 |
| 2.2 ANTECEDENTES NACIONALES | 5 |
| 2.3 BASES TEORICAS | 6 |
| 2.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO..... | 10 |
| III. METODOLOGÍA..... | 15 |
| 3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN | 15 |
| 3.2 POBLACIÓN, MUESTRA, MUESTREO, UNIDAD DE ANÁLISIS | 15 |
| 3.3 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN..... | 15 |
| 3.4 TÉCNICAS_E_INSTRUMENTOS_DE RECOLECCIÓN DE DATOS.. | 17 |
| 3.5 PROCEDIMIENTOS..... | 18 |
| 3.6 MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS | 19 |
| 3.7 ASPECTOS ÉTICOS..... | 19 |
| IV. RESULTADOS | 20 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE | 21 |
| 4.2 ANÁLISIS DE PUENTE CONVENCIONAL | 22 |

| | |
|---|----|
| 4.3 ANÁLISIS DE PUENTES AISLADOS..... | 34 |
| 4.4 COMPARACIÓN DE LOS PERIODOS Y VIBRACIONES MODALES | 43 |
| 4.5 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS | 45 |
| V. DISCUSIÓN..... | 62 |
| 5.1 RESUMEN DE LA COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL PUENTE | 62 |
| 5.2 COMPARACIÓN DEL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LA SUBESTRUCTURA..... | 64 |
| VI. CONCLUSIONES..... | 67 |
| VII. RECOMENDACIONES | 69 |
| REFERENCIAS..... | 70 |
| ANEXOS | 73 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Cargas permanentes | 7 |
| Tabla 2: Sobrecargas vivas | 7 |
| Tabla 3: Carga de viento | 8 |
| Tabla 4: Definición de clases de sitio | 8 |
| Tabla 5: Factores de sitio F_{pga} | 8 |
| Tabla 6: Factores de sitio F_a | 9 |
| Tabla 7: Factores de sitio F_v | 9 |
| Tabla 8: Matriz de operacionalización de variables | 16 |
| Tabla 9: Periodos y frecuencias de las vibraciones modales | 23 |
| Tabla 10: Porcentaje de masa que participa en los modos | 23 |
| Tabla 11: Respuesta espectral multimodal para sismo Longitudinal | 24 |
| Tabla 12: Respuesta espectral multimodal para sismo transversal | 24 |
| Tabla 13: Desplazamiento de la superestructura | 24 |
| Tabla 14: Desplazamiento de la subestructura | 24 |
| Tabla 15: Relación de registros sísmicos | 25 |
| Tabla 16: Respuesta para sismo longitudinal - Analisis Tiempo Historia | 28 |
| Tabla 17: Respuesta para sismo transversal - Analisis Tiempo Historia | 28 |
| Tabla 18: Desplazamiento en el tablero en direccion X e Y | 29 |
| Tabla 19: Desplazamientos bajo el tablero en direccion X e Y | 29 |
| Tabla 20: Elección del dispositivo aislador "LRB" | 35 |
| Tabla 21: Propiedades de los aisladores en el pilar requeridas por el programa CSIBridge v21 | 39 |
| Tabla 22: Propiedades de los aisladores | 41 |
| Tabla 23: Comparación del periodo fundamental en la dirección longitudinal del puente convencional y aislado | 43 |
| Tabla 24: Comparación del periodo fundamental en la dirección transversal del puente convencional y aislado | 44 |
| Tabla 25: Comparación de desplazamientos del puente con y sin aislamiento sísmico, para el análisis espectral multimodal | 45 |
| Tabla 26: Comparación de desplazamientos del puente con y sin aislamiento sísmico, para el análisis no lineal tiempo historia | 48 |

| | |
|--|----|
| Tabla 27: Respuesta sísmica de desplazamientos de la superestructura del puente convencional y aislado | 62 |
| Tabla 28: Respuesta sísmica de desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado | 62 |
| Tabla 29: Respuesta sísmica de la cortante basal de la subestructura del puente convencional y aislado | 62 |
| Tabla 30: Respuesta sísmica del momento en la base de la subestructura del puente convencional y aislado | 63 |
| Tabla 31: Sectorización de los niveles de desempeño del puente según | 64 |
| Tabla 32: Demanda vs capacidad en el sentido longitudinal y transversal de la estructura de puente convencional..... | 65 |
| Tabla 33: Demanda vs capacidad en el sentido longitudinal y transversal de la estructura de puente aislado | 65 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Espectro de respuesta de diseño | 10 |
| Figura 2: Disipación de energía de puente fijo y aislado | 11 |
| Figura 3: Curva de histéresis bilineal del aislador | 12 |
| Figura 4: Espectro de respuesta | 13 |
| Figura 5: Deformación por corte del aislador elastomérico | 12 |
| Figura 6: El Orden En Que Se Recogerán Los Datos | 17 |
| Figura 7: Secuencia del procedimiento de investigación..... | 18 |
| Figura 8: Procedimiento en análisis de datos..... | 19 |
| Figura 9: Ubicación de la zona en estudio | 20 |
| Figura 10: Planta típica del puente..... | 21 |
| Figura 11: Elevación típica del puente | 22 |
| Figura 12: Espectro de aceleraciones con 5% de amortiguamiento..... | 26 |
| Figura 13: Espectro de velocidades con 5% de amortiguamiento..... | 26 |
| Figura 14: Espectro de desplazamientos con 5% de amortiguamiento..... | 27 |
| Figura 15: Espectro de diseño..... | 27 |
| Figura 16: Historia en el tiempo de desplazamientos longitudinales para la subestructura con base rígida para el sismo 7039 | 30 |
| Figura 17: Historia en el tiempo de desplazamientos transversales para la subestructura con base rígida para el sismo 7050 | 30 |
| Figura 18: Curva de capacidad en el sentido longitudinal | 31 |
| Figura 19: Momento (Tn-m) vs rotación plástica (rad.) en el sentido longitudinal | 32 |
| Figura 20: Curva de capacidad en el sentido transversal..... | 32 |
| Figura 21: Momento (Tn-m) vs rotación plástica (rad.) en el sentido transversal . | 33 |
| Figura 22: Sectorización de curva de capacidad para sismo longitudinal | 33 |
| Figura 23: Sectorización de curva de capacidad para sismo transversal | 34 |
| Figura 24: Rigidez efectiva del sistema pilar y aislador | 37 |
| Figura 25: Definición de aisladores en los estribos norte y sur | 39 |
| Figura 26: Definición de aisladores en el pilar con propiedades no lineales en CSIBridge V21 | 40 |
| Figura 27: Espectro de diseño combinado | 41 |
| Figura 28: Sectorización de la curva de capacidad el sismo longitudinal | 42 |
| Figura 29: Sectorización de la curva de capacidad para el sismo transversa | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 30: Comparación de respuestas de periodos y aceleración espectral en la dirección longitudinal del puente | 44 |
| Figura 31: Comparación de respuestas de periodos y aceleración espectral en la dirección transversal del puente | 45 |
| Figura 32: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método multimodal espectral..... | 46 |
| Figura 33: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método multimodal espectral..... | 46 |
| Figura 34: Comparación de desplazamiento de la superestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método multimodal espectral..... | 47 |
| Figura 35: Comparación de desplazamiento de la superestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método multimodal espectral..... | 47 |
| Figura 36: Historia del desplazamiento longitudinal en el tiempo para el puente convencional para los seis casos de sismos en estudio..... | 48 |
| Figura 37: Historia del desplazamiento transversal en el tiempo para el puente convencional para los seis casos de sismos en estudio..... | 49 |
| Figura 38: Desplazamiento de la subestructura en el sentido longitudinal del puente convencional por el método de análisis no lineal tiempo historia. | 50 |
| Figura 39: Desplazamiento de la subestructura en el sentido transversal del puente convencional por el método de análisis no lineal tiempo historia. | 50 |
| Figura 40: Desplazamiento de la subestructura en el sentido longitudinal del puente aislado por el método de análisis no lineal tiempo historia. | 50 |
| Figura 41: Desplazamiento de la subestructura en el sentido transversal del puente aislado por el método de análisis no lineal tiempo historia. | 51 |
| Figura 42: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de análisis no lineal tiempo historia. | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 43: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de análisis no lineal tiempo historia..... | 51 |
| Figura 44: Desplazamiento de la superestructura para el sismo longitudinal por el método de análisis no lineal TH..... | 52 |
| Figura 45: Desplazamiento de la superestructura para el sismo transversal por el método de análisis no lineal TH..... | 52 |
| Figura 46: Desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado para el sismo longitudinal TH-7039. | 52 |
| Figura 47: Desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado para el sismo transversal TH-7050..... | 53 |
| Figura 48: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de análisis espectral multimodal..... | 53 |
| Figura 49: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de análisis espectral multimodal. | 53 |
| Figura 50: Momento en la base del pilar del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de análisis espectral multimodal..... | 54 |
| Figura 51: Momento en la base del pilar del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de análisis espectral multimodal..... | 54 |
| Figura 52: Cortante basal en el sentido longitudinal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 54 |
| Figura 53: Cortante basal en el sentido transversal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 55 |
| Figura 54: Momento en la base en el sentido longitudinal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 55 |
| Figura 55: Momento en la base en el sentido transversal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 55 |
| Figura 56: Cortante basal en el sentido longitudinal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 56 |
| Figura 57: Cortante basal en el sentido transversal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 58: Momento en la base del pilar en el sentido longitudinal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 56 |
| Figura 59: Momento en la base del pilar en el sentido transversal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia | 57 |
| Figura 60: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal TH-7039 por el método de análisis no lineal tiempo historia..... | 57 |
| Figura 61: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal TH-7050 por el método de análisis no lineal tiempo historia..... | 57 |
| Figura 62: Momento en la base del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal TH-7039 por el método de análisis no lineal tiempo historia..... | 58 |
| Figura 63: Momento en la base del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal TH-7050 por el método de análisis no lineal tiempo historia..... | 58 |
| Figura 64: Cortante basal del puente convencional y el puente aislado para el sismo longitudinal TH-7039..... | 58 |
| Figura 65: Cortante basal del puente convencional y el puente aislado para el sismo transversal TH-7050..... | 59 |
| Figura 66: Momento en la base del puente convencional y el puente aislado para el sismo longitudinal TH-7039 | 59 |
| Figura 67: Momento en la base del puente convencional y el puente aislado para el sismo transversal TH-7050..... | 59 |
| Figura 68: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 4 ubicado en el extremo del pilar con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones | 60 |
| Figura 69: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 3 ubicado en el extremo del pilar con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones | 60 |
| Figura 70: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 2 ubicado en el extremo del estribo sur con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 71: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 1 ubicado en el extremo del estribo sur con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones | 61 |
| Figura 72: Nivel de desempeño del puente en el sentido longitudinal..... | 64 |
| Figura 73: Nivel de desempeño del puente en el sentido transversal | 65 |

RESUMEN

El objetivo de este estudio es realizar un análisis estructural de un puente en el nudo viario Salcedo-Puno que cuenta con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB). La metodología para esta tesis es de tipo aplicada, se determinó la respuesta sísmica con el método Análisis Espectral Multimodal el desplazamiento en la subestructura del puente aislado se reduce en 83.09% para el sismo longitudinal y el 85.83% para el sismo transversal, sin embargo, En la superestructura del puente equipada con un aislante simulado, el desplazamiento aumenta un 118,90% en dirección transversal y un 74,35% en dirección longitudinal. La fuerza de cortante basal en el puente con aislación sísmica, se reduce el 81.83% para el sismo longitudinal y el 85.57% para el sismo transversal. El momento flector en la base del puente con aislación sísmica, se reduce en 82.79% para el sismo longitudinal y el 85.88% para el sismo transversal. El nivel de prestaciones es de "seguridad vital" tanto para ese diseño convencional como para el puente aislado. Se concluye que el puente aislado con este sistema de protección presenta una clara reducción de los desplazamientos y de las fuerzas internas en la subestructura en comparación con el diseño convencional; sin embargo, los desplazamientos en la superestructura aumentan como resultado de la disipación de energía causada por la deformación de los aisladores; esto sugiere que el modelo aislado es capaz de proporcionar condiciones más estables y seguras que el diseño convencional.

Palabras clave: Diseño convencional, aisladores elastoméricos, respuesta longitudinal y transversal.

ABSTRACT

The objective of this study is to carry out a structural analysis of a bridge at the Salcedo-Puno road junction equipped with lead core elastomeric isolators (LRB). The methodology for this thesis is of applied type, the seismic response was determined with the Multimodal Spectral Analysis method. The displacement in the substructure of the isolated bridge is reduced by 83.09% for the longitudinal earthquake and 85.83% for the transverse earthquake, however, in the bridge superstructure equipped with a simulated isolator, the displacement increases by 118.90% in the transverse direction and 74.35% in the longitudinal direction. The basal shear force in the bridge with simulated insulation is reduced by 81.83% for the longitudinal earthquake and 85.57% for the transverse earthquake. The bending moment at the base of the bridge with thermal insulation is reduced by 82.79% for the longitudinal earthquake and 85.88% for the transverse earthquake. The performance level is "life safety" for both the conventional design and the insulated bridge. It is concluded that the isolated bridge with this protection system presents a clear reduction of displacements and internal forces in the substructure compared to the conventional design; however, the displacements in the superstructure increase as a result of the energy dissipation caused by the deformation of the isolators; this suggests that the isolated model is able to provide more stable and safer conditions than the conventional design.

Keywords: Conventional design, elastomeric isolators, longitudinal and transverse response.

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el hombre viene buscando soluciones para evitar daños estructurales en puentes, producidos por eventos sísmicos recurrentes y en nuestro país es una preocupación constante, debido a que nos encontramos ubicados en el cinturón de fuego de América del Sur. La superestructura del puente intenta liberar la energía durante un evento sísmico induciendo una reacción inelástica en la subestructura (pilas y estribos). Sin embargo, en ocasiones, estas estructuras experimentan daños estructurales como resultado de estar expuestas a fuerzas sísmicas y ser incapaces de liberar esta energía. Esto se traduce en pérdidas directas (capital), costes de reparación, pérdidas indirectas (posible cierre, desvío e interrupción del flujo de vehículos) y, posiblemente, pérdidas (lesiones, siniestros).

La protección sísmica en puentes, consiste en añadir entre la superestructura y subestructura un dispositivo aislador que funcione en forma muy rígida en el sentido vertical y de baja rigidez en el sentido horizontal, El objetivo del aislamiento sísmico es alterar el periodo fundamental y mejorar la capacidad de la estructura para disipar la energía que le transfiere un terremoto. En consecuencia, es importante diseñar un puente que sea resistente a la actividad sísmica y disponga de métodos adicionales para disipar la energía de manera eficiente.

Puno es una ciudad que está situada en una región sísmicamente activa. El Instituto Geofísico del Perú (ICG) informó de que el 30 de noviembre de 2015 se produjo un terremoto de magnitud 3,5 en la escala de Richter, con epicentro en el barrio de Salcedo a una profundidad de 5,0 kilómetros. A la vez esta ciudad viene presentando problemas de tráfico vehicular principalmente en la intersección de la carretera Panamericana Sur, con la avenida estudiante del distrito de Salcedo, generando congestión vehicular ya que se trata de un cruce con ovalo de alto volumen de tráfico totalmente semaforizado y es la única salida y entrada del flujo vehicular proveniente de la provincias del Collao llave, Chuito y además de ser la vía de conexión con el país de Bolivia y por otra parte el flujo vehicular proveniente de la zona urbana del distrito de salcedo, viéndose este ovalo en continuo

embotellamiento, por lo que se pretende solucionar esta problemática, a través de un intercambio vial, levantado la rasante de la Panamericana sur, mediante un puente de paso a desnivel por la cual transitarán los vehículos provenientes del sur y a la vez permitirá el flujo vehicular proveniente de la zona urbana del distrito de Salcedo por debajo de dicho puente.

En caso de sismo, los puentes y viaductos son especialmente propensos a sufrir daños y derrumbarse. La mayoría de los puentes tienen un periodo básico de vibración en el rango de 0,2 a 1,2 segundos debido a su sencillo diseño estructural; en este rango, la reacción estructural es considerable, ya que se aproxima a las duraciones predominantes de los movimientos de rotación inducidos por terremotos. Aumentando la capacidad de disipación de energía o el periodo básico del puente, se pueden minimizar las fuerzas sísmicas en los puentes. Al estar situado en una ruta tan transitada como la Panamericana Sur, el aislamiento sísmico es una solución novedosa para la construcción de puentes sismorresistentes, lo que conlleva las siguientes cuestiones.

¿Cómo es el análisis estructural de un puente con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) en el intercambio vial Salcedo – Puno?

¿Cuál es la respuesta longitudinal y transversal del puente ante un sismo, utilizando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y aquel diseño convencional, con el software CSiBridge?, ¿Cómo es el desempeño sísmico del puente utilizando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y aquel con diseño convencional por el método simplificado y el método historial de tiempo no lineal mediante el software CSiBridge?

Pretendemos atenuar la necesidad de diseñar puentes que puedan sobrellevar sin problema alguno un evento sísmico, lo que implica buscar métodos que proporcionen soluciones reales, es por ello que se desea aislar la superestructura del puente de la subestructura a través un dispositivo denominado aislador sísmico, que tenga la capacidad de absorber energía dinámica, lo que generaría la disminución de los desplazamientos y mejor desempeño ante sismos, de tal manera

que los puentes no queden fuera de servicio posterior ocurrido un evento sísmico, ni que se vea comprometida la estabilidad de la misma.

Por lo tanto, el objetivo general es realizar un estudio estructural de un puente en el nudo viario Salcedo-Puno que disponga de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Otros objetivos propuestos son los siguientes Con la ayuda del programa CSiBridge, determinar la reacción longitudinal y transversal del puente ante un sismo empleando aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) y el diseño convencional. Utilizar el programa CSiBridge para analizar el comportamiento sísmico del puente empleando aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) y el diseño tradicional utilizando la técnica aerodinámica y el método no lineal de la historia del tiempo.

La premisa general es: El estudio estructural de un puente con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) mejora el desempeño frente a requerimientos sísmicos repetidos en el nudo vial Salcedo-Puno, de acuerdo a los postulados del tema de investigación y los antecedentes consultados.

Además de la hipótesis particular, el programa CSiBridge demuestra que el empleo de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) produce resultados superiores al diseño tradicional para la respuesta longitudinal y transversal del puente ante un sismo. Mediante el uso de la técnica racionalizada del programa CSiBridge y el método de historia temporal no lineal, el comportamiento sísmico del puente que utiliza aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) es superior al del diseño tradicional.

El objetivo de esta tesis es demostrar lo bien que se puede aislar un puente utilizando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), por tanto, demostrar de forma concluyente que estos puentes tienen una respuesta sísmica mínima.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Los terremotos de larga duración que ocurrieron en Chile en 2010, 2014 y 2015, Japón en 2011, China en 2008 e Indonesia en 2004 son recordatorios de la importancia del efecto de la duración del movimiento del suelo en la respuesta estructural. (Mohammed et al., 2017).

El aislamiento base evolucionó y cambió el comportamiento de las estructuras de ingeniería civil. proporcionar una forma de fuerza de amortiguamiento para disipar la energía cinética y reducir el desplazamiento relativo, el diseño sísmico de los puentes se basa en los resultados de los modelos computacionales estructurales estas presentan errores promedio para los desplazamientos y cortantes base fueron 21 % y 25 % en la dirección transversal, respectivamente, y 7 % y 10 % en la dirección longitudinal. Respectivamente. (Constantinescu & Răcănel, 2017; Li et al., 2020; Benjumea et al., 2020; Ismail et al., 2016).

En puente simplemente apoyado de varios tramos con dispositivos de soporte de LRB, Los tres primeros modos dominantes del puente se encuentran en las direcciones longitudinales, Los efectos de golpeteo generalmente conducen a una disminución en los desplazamientos relativos de la brecha. Las deformaciones de corte máximas calculadas de LRB en la dirección longitudinal son más pronunciadas cuando se desprecian los efectos del golpeteo. (Ouanani et al., 2020). la comparación entre la vulnerabilidad de puentes construidos y puentes aislados a daños leves reveló que se puede esperar una reducción significativa. Para los puentes de hormigón esta probabilidad se reduce del 83 % y para los puentes de acero se reduce del 77%. (Siqueira, Sanda, et al., 2014). Los elementos transversales de los puentes con aislamiento, se redujeron en un porcentaje entre un 25% y un 35%, con desplazamientos relativos del tablero del puente máx. 30 mm. (Constantinescu & Răcănel, 2017). la energía sísmica de entrada a la estructura del puente agranda con el aumento del coeficiente de fricción, y la influencia del período de aislamiento 2,46 s a 3,17 s. (Li et al., 2020).

En puente con aislamiento, su tasa máxima de reducción de la aceleración máxima en la parte superior del pilar después del terremoto es del 24,6 % en comparación con la parte inferior del pilar. Su efecto de amortiguamiento es más significativo con el aumento de la intensidad sísmica. La tasa de reducción máxima es del 47,3% para la aceleración máxima radial y del 55,5% para la aceleración máxima tangencial. (Yan et al., 2016). en los apoyos intermedios y transversalmente restringidos en los estribos, se puede concluir que (1) Con apoyo intermedio, las reacciones de apoyo no disminuyen significativamente al aumentar la rigidez del apoyo; (2) a mayor amortiguamiento de los apoyos genera una disminución de las reacciones en los estribos.(Tubaldi et al., 2015).

En puentes con aisladores ubicados en regiones frías, los LRB pueden diseñarse con un tamaño o una rigidez lateral más pequeños que los de las regiones no frías. (Deng et al., 2020). Los efectos de la temperatura baja de -30 °C donde la rigidez efectiva de los cojinetes elastoméricos aumentó en un 180 %, Llegaron a la conclusión de que la rigidez al corte de los materiales elastoméricos aumenta considerablemente al disminuir la temperatura, por lo que se requiere un proceso de fabricación especial.(Billah & Todorov, 2019). También se requieren relaciones entre la temperatura y las propiedades del sistema de aislamiento de base sísmica. (Nassar et al., 2019).

2.2 ANTECEDENTES NACIONALES

El aislamiento sísmico ha demostrado ser un diseño confiable y una estrategia de actualización para mejorar el desempeño sísmico adoptada en América del Sur y Perú, desde la década de 2010 con el objetivo de proporcionar la flexibilidad lateral que alargue el período fundamental de la estructura para reducir drásticamente las demandas sísmicas. (Cobo et al., 2018).

En un terremoto longitudinal, una subestructura de puente con un aislador simulado reduce el desplazamiento en un 54%, y en un terremoto transversal, en un 25%. Con un aislador simulado, el desplazamiento de la superestructura del puente 1 aumenta un 18% durante un terremoto longitudinal y un 265% en un terremoto transversal. En un terremoto longitudinal, la superestructura del puente 2 reduce el

desplazamiento en un 53%, y en un terremoto transversal, en un 44%. En un seísmo longitudinal, la superestructura del puente 2 aumenta el desplazamiento en un 31%, y en un seísmo transversal, en un 22%. (Minchán, 2016).

La respuesta en puentes aislados ubicado en el departamento de Piura, genera menor desplazamientos en el tablero con 2.91%. con lo evaluado con respecto al péndulo friccional, el desplazamiento da como resultado 5.60 in con aislador elastómero y un 5.75 in con péndulo friccional. (Lama & Vásquez, 2019)

2.3 BASES TEÓRICAS

FILOSOFIA DE DISEÑO DE PUENTES

Al separar físicamente la superestructura de un puente de los componentes horizontales del movimiento del suelo provocado por un terremoto, se logra a travez del aislamiento sísmico que es un método de modificación de la respuesta que reduce el impacto de los terremotos en puentes y otras estructuras. (Osgooei et al., 2017). El desacoplamiento se consigue insertando componentes mecánicos, también conocidos como cojinetes de aislamiento sísmico o aisladores, que tienen una rigidez horizontal muy baja entre la superestructura y los cimientos. (Buckle et al., 2006). Para lograr los resultados previstos de viabilidad, seguridad y capacidad de servicio, teniendo debidamente en cuenta los elementos de operatividad, presupuesto, será necesario diseñar los puentes para los estados límite designados. (AASHTO, 2014). se han desarrollado múltiples ideas para el aislamiento de estructuras constructivas que, mediante la introducción de dispositivos especiales dentro de la estructura de resistencia, logran cambiar la respuesta de la estructura durante las acciones dinámicas. (Load et al., 2020). Durante un terremoto fuerte, los aisladores agregan flexibilidad lateral al puente, cambiando los periodos de vibración de las estructuras para evitar la resonancia con las excitaciones. Esto permite que la superestructura oscile a una frecuencia más baja que los pilares, lo que da como resultado grandes desplazamientos relativos a través de la interfaz del aislador. (Avossa et al., 2018).

FACTOR DE CARGAS

Cargas permanentes

Tabla 1: Cargas permanentes

| Cargas Permanentes (DC, DW y EV) | |
|----------------------------------|---|
| DC | Peso propio de los componentes estructurales y no estructurales |
| DW | Peso propio de las superficies de rodamiento e instalaciones para servicios públicos. |
| EV | Presión vertical del peso propio del suelo de relleno |

Fuente: (Rodríguez, 2020)

Sobrecargas vivas

Tabla 2: Sobrecargas vivas

| Sobrecargas Vivas (LL y PL) | |
|-----------------------------|---|
| LL | Sobrecarga Vehicular |
| PL | Sobrecarga peatonal (366.00 kg/m ²) |
| Carga HL-93k | |
| | |
| Carga HL-93M | |
| | |

Fuente: (Rodríguez, 2020)

Sobrecargas de viento

Tabla 3: Carga de viento

| Cargas de viento (WL y WS) | |
|----------------------------|----------------------------|
| WL | Viento sobre la sobrecarga |
| WS | Viento sobre la estructura |

Fuente: (Rodríguez, 2020)

Efectos sísmicos

Tabla 4: Definición de clases de sitio

| CLASE DE SITIO | \bar{V}_s | \bar{N} o \bar{N}_{ch} | \bar{S}_u |
|---|---------------------------|----------------------------|-----------------|
| A. Roca Dura | > 5,000 ft/s | NA | NA |
| B. Roca | 2,500 a 5,000 ft/s | NA | NA |
| C. Suelo muy denso | 1,200 a 2,500 ft/s | > 50 | >2,000psf |
| D. Suelo Rígido | 600 a 1,200 ft/s | 15 a 50 | 1,000a2,000 psf |
| E. Suelo de arcilla blanda | < 600 ft/s | < 50 | <1,000psf |
| F. Suelo que requiere análisis de suelo | Revisar Norma AASTHO 2017 | | |

Fuente: (AASHTO, 2017)

Tabla 5: Factores de sitio F_{pga}

| Coeficiente de Aceleración Pico del terreno (PGA) | | | | | |
|---|--|----------|----------|----------|----------|
| Clase de Sitio | 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 | *(Realizar inves. Geotéc. Esp. del sitio) | | | | |

Fuente: (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2018)

Tabla 6: Factores de sitio F_a

| Coeficiente de Aceleración Espectral en Periodo 0.2s (S_s) | | | | | |
|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Clase de Sitio | $S_s < 0.25$ | $S_s = 0.50$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 1.00$ | $S_s > 1.25$ |
| 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 | *(Realizar inves. Geotéc. Esp. del sitio) | | | | |

Fuente: (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2018)

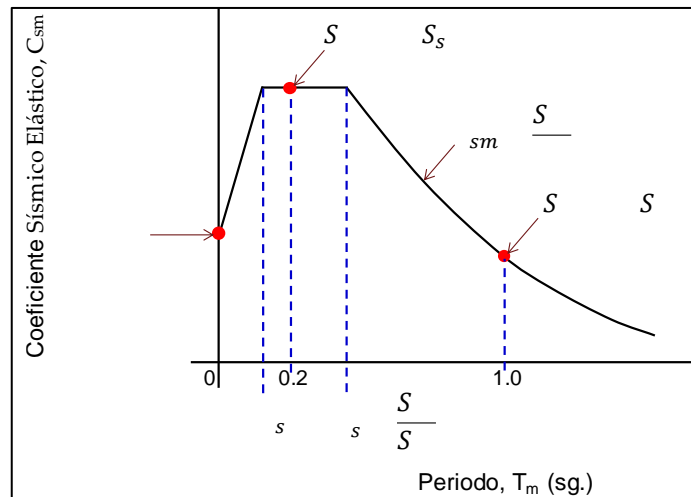
Tabla 7: Factores de sitio F_v

| Coeficiente de Aceleración Espectral en Periodo 1.0s (S_1) | | | | | |
|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Clase de Sitio | $S_1 < 0.10$ | $S_1 = 0.20$ | $S_1 = 0.30$ | $S_1 = 0.40$ | $S_1 > 0.50$ |
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| C | 1.7 | 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 | *(Realizar inves. Geotéc. Esp. del sitio) | | | | |

Fuente: (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2018)

Debe utilizarse el espectro de respuesta de diseño amortiguado al cinco por ciento. Para crear este espectro se utilizarán los coeficientes cartográficos de aceleración máxima del terreno y los coeficientes de aceleración espectral, escalados por los factores de emplazamiento de período cero, corto y largo, F_{pga} , F_a y F_v . (Lee Marsh et al., 2014)

Figura 1: Espectro de respuesta de diseño



Fuente: (ASSTHO, 2010)

2.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

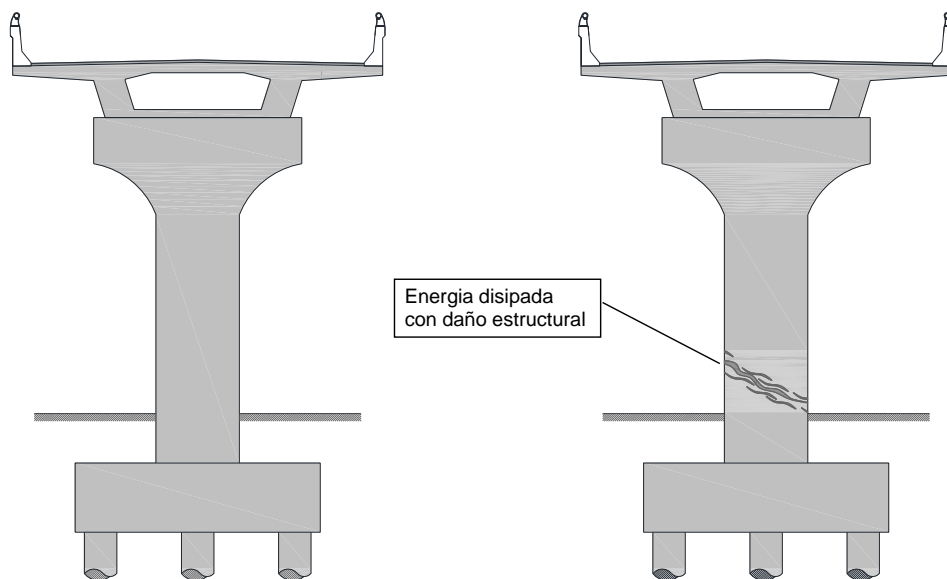
El objetivo del aislamiento sísmico del puente es desacoplar la respuesta de la superestructura de una excitación sísmica, disipando la energía sísmica con dispositivos de aislamiento como aisladores, reduciendo así la aceleración del tablero y la fuerza transmitida a la subestructura. (Billah & Todorov, 2019; Zhang et al., 2013). El uso óptimo de modernos sistemas de aislamiento antisísmico en puentes, se basa en el uso de aisladores acoplados a dispositivos disipadores de energía para absorber y consumir la energía inducida por el sismo en el interior de la estructura, asegurando el amortiguamiento histerético del sistema estructural. (Load et al., 2020).

En los puentes de vigas separadas, aislados con cojinete de caucho de plomo (LRB), Se determinó que este tipo de estructura de puente aislada no solo puede cumplir con los requisitos de diseño en diversas condiciones de trabajo, sino que también puede reducir de manera efectiva el efecto sísmico en el pilar del puente. (Liu & Yang, 2020). el uso de aisladores sísmicos es efectivo para reducir significativamente el daño de columna esperado además reduce las demandas de deformación entre estribos y zapatas, pero la principal contribución del aislamiento sísmico es la reducción de la variabilidad de las respuestas de los puentes. (Siqueira, Tavares, et al., 2014).

Los puentes aislados curvados horizontalmente sujetos a movimientos de suelo cercanos a la falla generan más demanda de fuerza y desplazamiento en el pilar y la plataforma. (Minavand & Ghafory-Ashtiany, 2019). Los aisladores elastoméricos reforzados con acero (SREI) son el tipo más común de dispositivo de aislamiento sísmico en uso. Están compuestos por capas elastoméricas intercaladas por cuñas de acero de refuerzo. (Osgoeei et al., 2017).

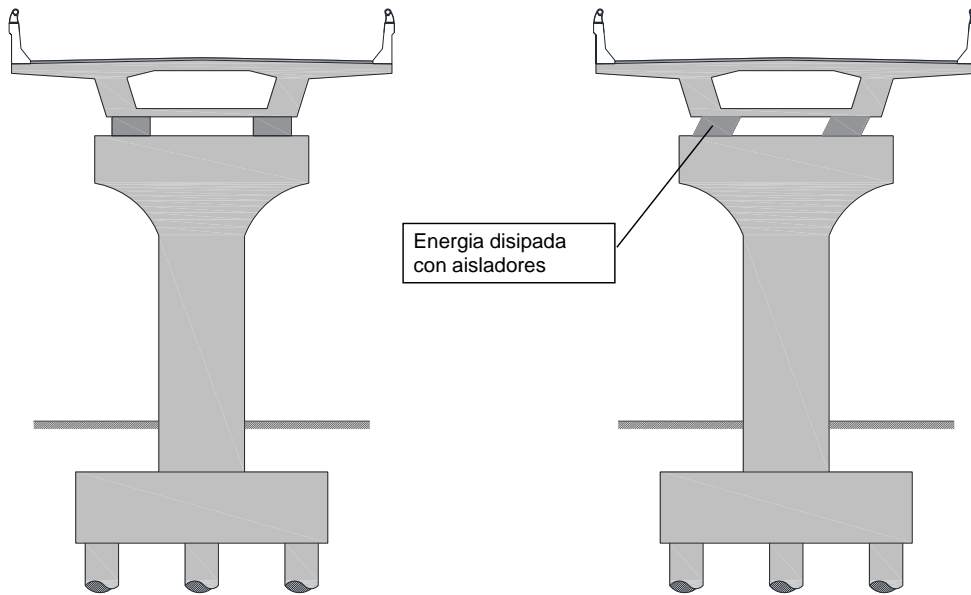
Durante un terremoto fuerte, los aisladores agregan flexibilidad lateral al puente, cambiando los periodos de vibración de las estructuras para evitar la resonancia con las excitaciones, esto permite que la superestructura oscile a una frecuencia más baja que los pilares, lo que da como resultado grandes desplazamientos relativos a través de la interfaz del aislador. (Avossa et al., 2018).

Figura 2: Disipación de energía de puente fijo y aislado



a).- Puente convencional donde se produce deformación en subestructura.

Fuente: (Buckle et al., 2006)

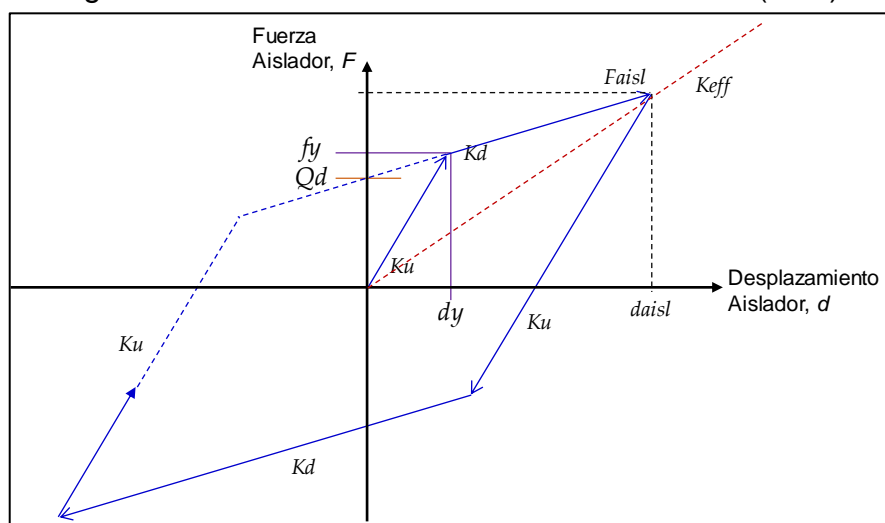


b).- Puente sismicamente aislado con deformación en el aislador.

Fuente: (Buckle et al., 2006)

Por razones de diseño, la relación fuerza-deformación puede diferenciar como una curva bilineal, que se distingue para estados de carga bajos por una rigidez lateral elástica (K_u). Se prevé que la fuerza en el aislante supere su límite elástico (F_y) en respuesta a una demanda sísmica. El aislante se deforma sustancialmente a medida que fluye, reduciendo su rigidez (K_d). A fin de simplificar el comportamiento para un análisis lineal, se puede suponer un comportamiento efectivo (K_{eff}) a partir de la deformación y fuerza máximas permitidas para el aislador.

Figura 3: Curva de histéresis bilineal del aislador (LRB).



Fuente: (Javanmardi et al., 2018)

Dónde:

K_u : Rigidez elástica (descarga)

Q_d : Resistencia característica

K_d : Rigidez post-cedencia

f_y : Fuerza en la cedencia

F_{aisl} : Fuerza lateral

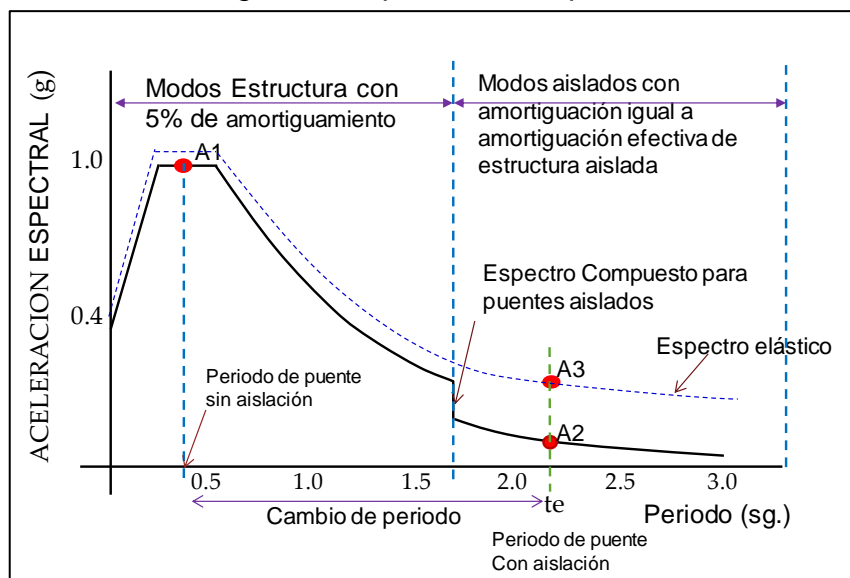
d_y : Desplazamiento elástico

D_{aisl} : Desplazamiento lateral

K_{eff} : Rigidez efectiva

El espectro de respuesta especificado para el análisis es el espectro amortiguado al 5 por ciento modificado para los efectos del amortiguamiento más alto. Las ordenadas del espectro de respuesta amortiguado al 5 por ciento para valores de período superiores a $0,8T_{eff}$, se dividen por el factor de reducción de amortiguamiento B para el amortiguamiento efectivo del puente aislado. (Constantinou et al., 2011).

Figura 4: Espectro de respuesta



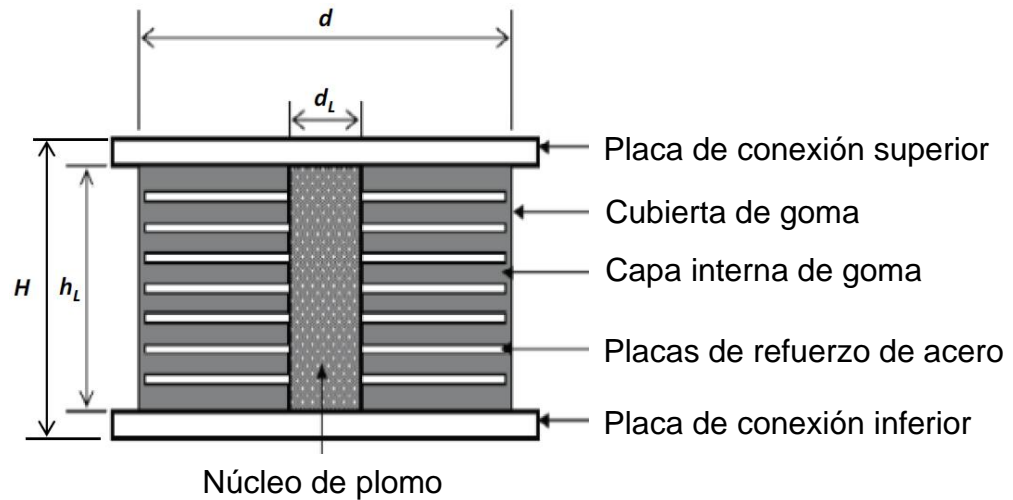
Fuente: (ASSTHO, 2010)

DISEÑO DE AISLADOR ELASTÓMERO (LRB)

El diseño consiste en determinar las propiedades requeridas del sistema (Q_d y K_d) para cumplir con el rendimiento deseado, la rigidez lateral combinada del núcleo de plomo y las capas de caucho proporciona una elevada rigidez elástica lateral bajo cargas de servicio, lo que ayuda a regular el movimiento de la estructura. Bajo el efecto de las cargas sísmicas, las placas de refuerzo de acero obligan al núcleo de plomo a deformarse por corte. Una vez que se produce la deformación, la rigidez

lateral del rodamiento se reduce considerablemente. Luego, las capas de caucho se deforman fácilmente al cortarse, lo que proporciona la flexibilidad lateral para alargar el período del puente. (Buckle et al., 2006).

Figura 5: Sistema aislador LRB



Fuente: (Edalati & Tahghighi, 2020)

En el bucle de histéresis de la figura 03, Q_d es la resistencia característica del rodamiento y F_y es el límite elástico. Dado que el elastómero es un caucho natural estándar de baja amortiguación, tanto Q_d como F_y están determinados por el núcleo de plomo. (Buckle et al., 2006).

$$y = \frac{1}{\psi} f_{yL} \frac{\pi d_L^2}{4}$$

Dónde:

f_{yL} : Esfuerzo cortante elástico del plomo (1.3 ksi, 9.0 MPa)

d_L : Diámetro de la clavija de plomo

ψ : Factor de carga que representa la fluencia en el plomo

: 1.0 para cargas dinámicas (sísmicas)

: 2.0 para cargas de servicio (cargas de viento y de frenado)

: 3.0 para cargas de aplicación lenta (efecto ambiental expansión térmica)

La fuerza característica, Q_d , viene dada por:

$$Q_d = F_y(1 - K_d/K_u)$$

Dónde:

k_d : Rigidez post-elástica

k_u : Rigidez elástica de carga y descarga = ($n \cdot k_d$)

n : 10 para cargas dinámicas (sísmicas)

: 8 para cargas de servicio (cargas de viento y de frenado)

: 5 para cargas de aplicación lenta (efecto ambiental expansión térmica)

Para cargas sísmicas, la ecuación se convierte en

$$Q_d = .9F_y$$

De las ecuaciones se deduce que para $f_{yL} = 1.3$ ksi (9.0 MPa) y $\psi = 1.0$

$$Q_d \approx 0.9d_L^2 \text{ Kips}, \quad d_L \text{ en pulg.}$$

$$\approx 6.4d_L^2 \text{ N}, \quad d_L \text{ en milímetros.}$$

Aunque la rigidez post-flujo del núcleo de plomo tiene un impacto, la rigidez post-elástica k_d es causada principalmente por la rigidez del caucho. Por lo tanto:

$$k_d = f f k_r$$

Dónde:

f : Factor de contribución del plomo (generalmente se toma igual a 1.1).

k_r : Rigidez elástica del material de caucho

$$k_r = \frac{b}{r}$$

Dónde:

G : Módulo de corte del caucho

T_r : Espesor total de caucho

A_b : Área neta unida de caucho

El área unida neta A_b es el área bruta del cojinete menos el área del núcleo de plomo. Por lo tanto:

$$A_b = \frac{\pi(d_b^2 - d_L^2)}{4}$$

Dónde:

D_b : Diámetro del caucho aglomerado

De la curva de histéresis, la fuerza horizontal total F en el desplazamiento D viene dada por:

$$Q_d + k_d D$$

y el desplazamiento de fluencia, D_y , del rodamiento viene dado por:

$$Q_y = \frac{Q_d}{k_u - k_d}$$

Las propiedades equivalentes (linealizadas) la rigidez efectiva del aislante del núcleo de plomo para su uso en técnicas elásticas de análisis k_e así como la correspondiente relación de amortiguación viscosa β_e . La rigidez efectiva se obtiene dividiendo la fuerza horizontal, F , por el correspondiente desplazamiento del rodamiento, D .

$$k_e = \frac{Q_d}{D} + k_d$$

La relación de amortiguación viscosa correspondiente, β_e , viene dada por la ecuación.

$$\beta_e = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi k_e D^2} = \frac{2Q_d(D - D_y)}{\pi D(Q_d + k_d D)}$$

III. METODOLOGÍA

3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Tipo de Investigación

Para esta tesis se ha recurrido a la investigación práctica.

Diseño de Investigación

Diseño no experimental, gestión de las variables independientes, prueba de la hipótesis y análisis de su impacto en las variables dependientes.

3.2 POBLACIÓN, MUESTRA, MUESTREO, UNIDAD DE ANÁLISIS

Población

Está conformado por los puentes de la ciudad de Puno u Juliaca pertenecientes a la región puno con un total de 7 puentes. Las cuales estarán conformadas por estructuras puentes, vehiculares, peatonales y otros.

Muestra

De la población señalada se ha tomado como muestra el puente proyectado en el intercambio vial Salcedo ubicado en ciudad de Puno. La muestra está constituida por puente de apoyo continuo en tres tramos de (25m, 30m y 25m), con una longitud total 80 m. de tablero viga cajón, que tienen dos carriles y bermas con un ancho total de 10.60 m.

Unidad de Análisis

La región de investigación se encuentra en la ciudad de Puno, y se eligió como unidad de análisis un puente de concreto de soporte continuo con tablero tipo cajón que consta de la superestructura y la subestructura.

3.3 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN

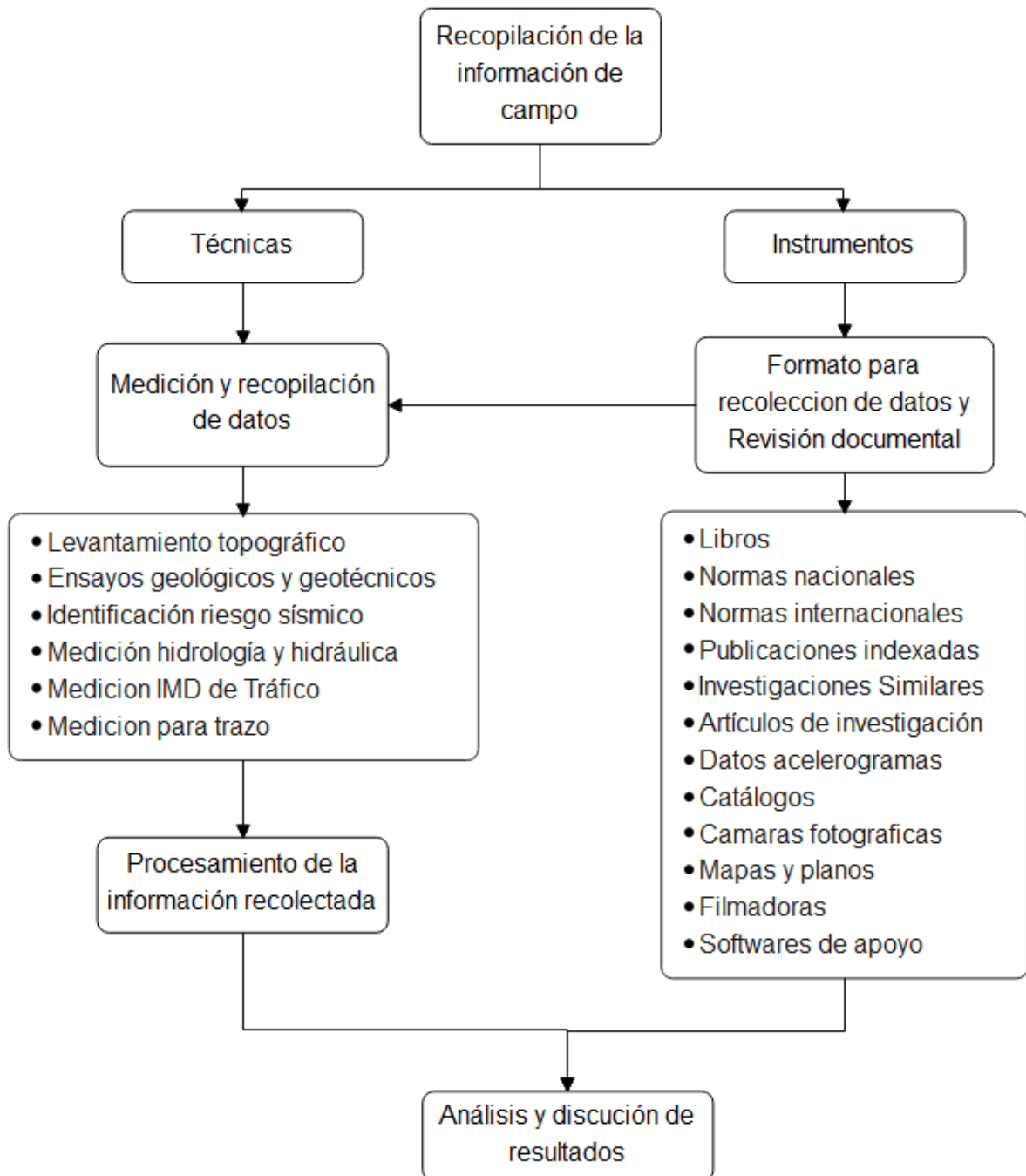
La presente investigación está formada por el comportamiento de las siguientes variables Ver tabla 08.

Tabla 8: Matriz de operacionalización de variables

| VARIABLES | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIONES | INDICADORES | ESCALA DE MEDICIÓN |
|---|---|---|--|-------------------------|--------------------|
| VARIABLE INDEPENDIENTE | El aislamiento sísmico en puentes es desacoplar la estructura de los movimientos sísmicos del suelo, donde los efectos de inercia vibratoria se separan en la interfaz entre la superestructura y la subestructura, lo que reduce las fuerzas transmitidas a las columnas, pilares y cimientos. | Se procederá a adicionar un dispositivo elastomérico (LRB), entre la plataforma y la parte superior de los pilares y se llevara a cabo una comparación de puentes aislados con respecto a puentes no aislados. Según la normatividad AASHTO-LRFD 2014 | Ductilidad de la estructura | Desplazamiento | Metros (m) |
| | | | | Frecuencia natural | hercios (Hz) |
| | | | | Periodo natural | segundos (s) |
| PUENTE CON Y SIN AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB) | | | Propiedades mecánicas del aislador LRB | Límite elástico | MPa |
| | | | | Rigidez elástica | N.m ² |
| | | | | Amortiguación | porcentaje (%) |
| VARIABLE DEPENDIENTE | La respuesta sísmica son los, desplazamiento longitudinales, desplazamientos transversales, las aceleraciones, los momento de flexión y esfuerzos axiales. en la estructura del puente. | Se procederá a analizar los efectos del aislamiento sísmico en la respuesta máxima de los puentes aislados con respecto a puentes no aislados mediante el seguimiento de parámetros de respuesta. Según la normatividad AASHTO-LRFD 2014 | Análisis comparativo de parámetros dinámicos | Masa | Toneladas (Ton) |
| Desplazamientos | | | | metros (m) | |
| Fuerzas cortantes | | | | Toneladas (Ton) | |
| Momentos flectores | | | | Toneladas metro (Ton-m) | |
| Ratios de capacidad | | | | porcentaje (%) | |
| Frecuencia natural | | | | hercios (Hz) | |
| Periodo natural | | | | segundos (s) | |
| RESPUESTA SÍSMICA DEL PUENTE | | | | | |

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

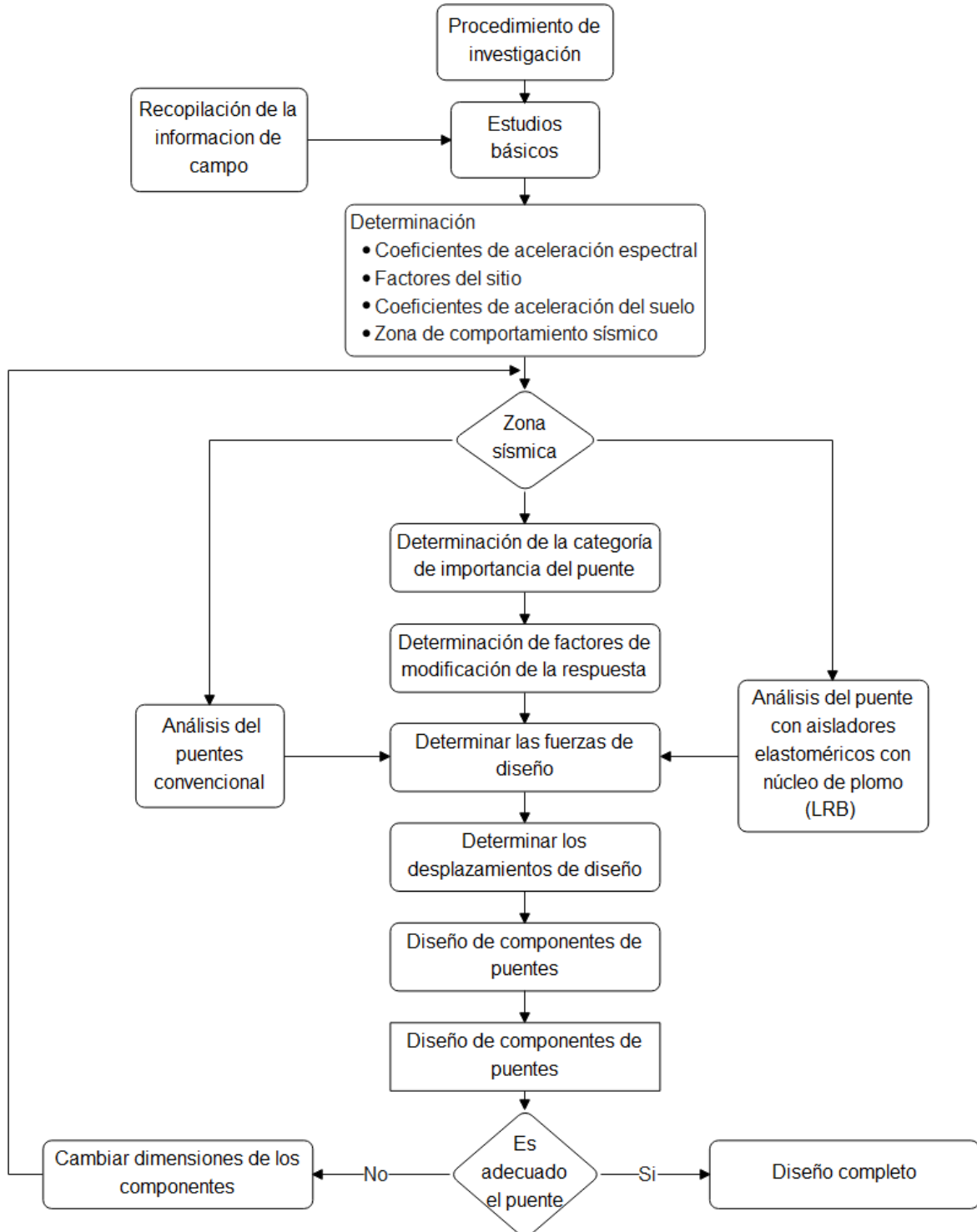
Figura 6: El Orden En Que Se Recogerán Los Datos



Fuente: Elaboración propia

3.5 PROCEDIMIENTOS

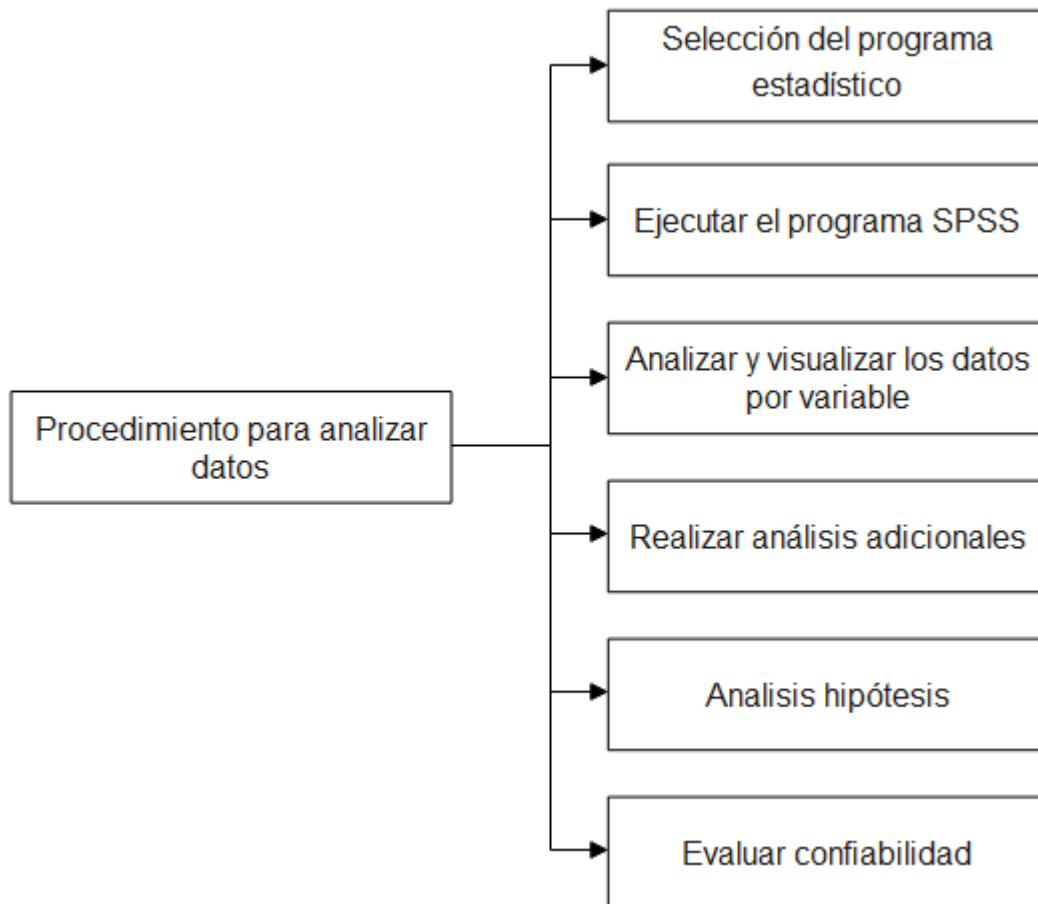
Figura 7: Secuencia del procedimiento de investigación



Fuente: Elaboración propia

3.6 MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS

Figura 8: Procedimiento en análisis de datos



Fuente: Elaboración propia

3.7 ASPECTOS ÉTICOS

La presente investigación es una creación única mía que aún no se ha publicado. Por el presente juro que no es un duplicado de ningún trabajo publicado anteriormente y que fue creada por mi deseo de aprender más sobre el tema. Los criterios del RCUN 0262-2020/UCV de 28 de agosto de 2020, que contiene el Código Ético de Investigación de la Unión Europea, son algo más que declaro conocer y que cumpliré.

IV. RESULTADOS

El área de investigación se ubica en la jurisdicción del Departamento de Puno, al sur de nuestra nación, a lo largo de la Carretera Panamericana Sur con Avenida del Estudiante en el barrio de Salcedo, en una región urbana del lado sureste de Puno.

Carretera : Vía Panamericana Sur (Ruta nacional PE-3S)

Tramo : Puno - Desaguadero

Progresiva : Km. 00+000 – Km. 00+540

Departamento : Puno

Provincia : Puno

Distrito : Puno

Altitud : Inicio 3815.10 msnm.

Coordenadas UTM : E-392 941.537, N-8 245 967.224 y
E-393 430.730, N-8 245 765.854

El tramo en estudio se ubica en la salida Puno – Desaguadero Ruta PE-3S, inicia en la prog. 00+000, hasta la cota prog. 00+540 con una cota de 3815.10 msnm.,

Figura 9: Ubicación de la zona en estudio

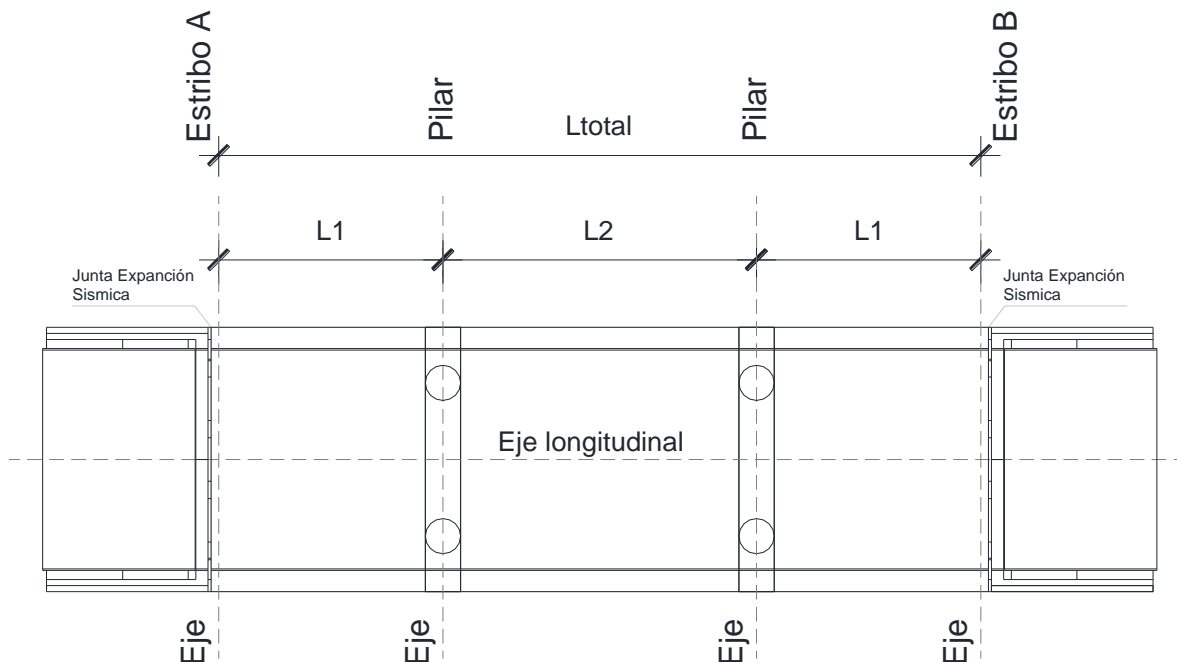


Fuente: Elaboración propia

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

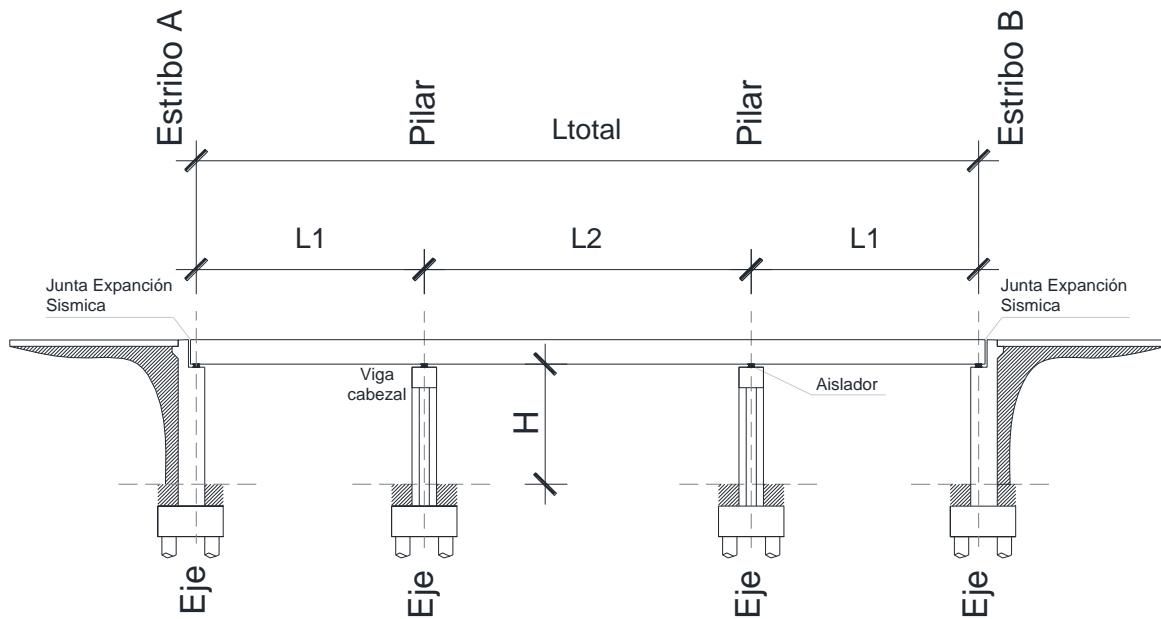
El puente consiste de una superestructura de vigas de caja pretensado de concreto vaciado in situ, de tres tramos, continuos de 25, 30 y 25m. con un total de 80m. El puente tiene dos carriles de 7,20 m de ancho cada uno. 10,60 m de longitud total, bermas de 1,30 m y barreras de hormigón de 0,4 m, con una altura libre vertical de 6,0 m. La subestructura está formada por dos pilares centrales y una viga transversal en la parte superior. La subestructura está formada por dos pilares centrales y una viga transversal en la parte superior. Se instalarán aisladores elastoméricos (LRB) en la parte superior de los pilares y se introducirán pequeños cambios en la geometría del puente para facilitar el aislamiento sísmico (por ejemplo, uso de juntas de dilatación modulares, uso de vigas transversales separadas en lugar de una integral con la viga cajón, pilares que se fijarán en las zapatas). Los esquemas en alzado y planta del puente investigado se muestran en los siguientes dibujos.

Figura 10: Planta típica del puente



Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Elevación típica del puente



Fuente: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS DE PUENTE CONVENCIONAL

4.2.1 ANÁLISIS ESPECTRAL MULTIMODAL (MM)

Alude a un análisis modal multimodal lineal que tiene en cuenta la elasticidad de los componentes. Un modo dominado por los desplazamientos en dirección longitudinal, otro dominado por los desplazamientos en dirección transversal y, por último, un modo rotatorio para todo el sistema constituyen los principales modos vibratorios en un puente típico.

MODOS Y PERIODOS DE VIBRACIÓN

Se emplearon doce modos de vibración en el análisis espectral multimodal, que es la superposición de respuestas modales separadas para estimar la respuesta sísmica completa, para el puente investigado. Los modos son adecuados para calcular con precisión las fuerzas y los desplazamientos.

Tabla 9: Periodos y frecuencias de las vibraciones modales

| Modo | Periodo Sg | Frecuencia Cyc/sg | CircFreq Rad/sg | Eigen valor Rad ² /sg ² |
|------|------------|-------------------|-----------------|---|
| 1 | 2.412 | 0.415 | 2.605 | 6.788 |
| 2 | 0.612 | 1.616 | 10.152 | 103.062 |
| 3 | 0.528 | 1.895 | 11.909 | 141.832 |
| 4 | 0.256 | 3.911 | 24.575 | 603.92 |
| 5 | 0.176 | 5.673 | 35.647 | 1270.74 |
| 6 | 0.157 | 6.383 | 40.108 | 1608.66 |
| 7 | 0.092 | 10.911 | 68.554 | 4699.68 |
| 8 | 0.079 | 12.604 | 79.192 | 6271.33 |
| 9 | 0.069 | 14.397 | 90.456 | 8182.29 |
| 10 | 0.064 | 15.59 | 97.952 | 9594.55 |
| 11 | 0.063 | 15.96 | 100.281 | 10056.34 |
| 12 | 0.055 | 18.202 | 114.364 | 13079.14 |

Fuente: Elaboración propia

MÍNIMO NÚMERO DE MODOS

Se han añadido sesenta modos vectoriales de Ritz para estimar con precisión la respuesta y las fuerzas internas; se trata de una cantidad de modos suficiente para poder calcular las fuerzas y los desplazamientos. Calculando la proporción de masa acumulada implicada para el número requerido de modos y verificando que es el 100% del total para cada dirección de carga aplicada, se determina el número de modos suficientes. Cabe destacar que la masa acumulada estática.

Tabla 10: Porcentaje de masa que participa en los modos

| Modal | Dirección | Estatico % | Dinamico % |
|-------|-----------|------------|------------|
| Modal | UX | 100 | 100 |
| Modal | UY | 100 | 99.992 |
| Modal | UZ | 100 | 99.517 |

Fuente: Elaboración propia

COMBINACIÓN DE MODOS

La respuesta global se establece por superposición de los modales. Como método recomendado por la norma AASHTO LRFD y el método por defecto para CSIBridge, se utilizó CQC para esta investigación.

DETERMINACIÓN DE FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS EN CADA DIRECCIÓN

Los cálculos, que incluyen combinaciones modales, se realizan mediante el software de análisis. En esta investigación se emplearon 60 modos para describir la reacción. Las tablas siguientes muestran los resultados de las fuerzas internas y los momentos flectores.

Tabla 11: Respuesta espectral multimodal para sismo Longitudinal

| Descripción | Sismo Loongitudinal - Sx | | |
|-------------|--------------------------|---------------|----------------|
| | Axial (Tn) | Cortante (Tn) | Momento (Tn-m) |
| Base Pilar | 710.93 | 1044.89 | 8364.28 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Respuesta espectral multimodal para sismo transversal

| Descripción | Sismo Loongitudinal - Sx | | |
|-------------|--------------------------|---------------|----------------|
| | Axial (Tn) | Cortante (Tn) | Momento (Tn-m) |
| Base Pilar | 710.93 | 1176.584 | 6524.13 |

Fuente: Elaboración propia

Las tablas siguientes muestran los desplazamientos para los exámenes longitudinales y transversales de la superestructura (C.G. del tablero) y de la subestructura (nudo superior del pilar).

Tabla 13: Desplazamiento de la superestructura

| Descripción | Desplazamiento en el C.G. del tablero | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------|
| | Sismo longitudinal | Sismo transversal |
| | Global X (cm) | Global Y (cm) |
| Puente | 9.734 | 7.667 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Desplazamiento de la subestructura

| Descripción | Desplazamiento en el C.G. del tablero | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------|
| | Sismo longitudinal | Sismo transversal |
| | Global X (cm) | Global Y (cm) |
| Puente | 7.858 | 5.113 |

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA (TH)

Equivale a un análisis dinámico no lineal, que tiene en cuenta el comportamiento no lineal de los componentes estructurales y el impacto de la pérdida de energía del sistema.

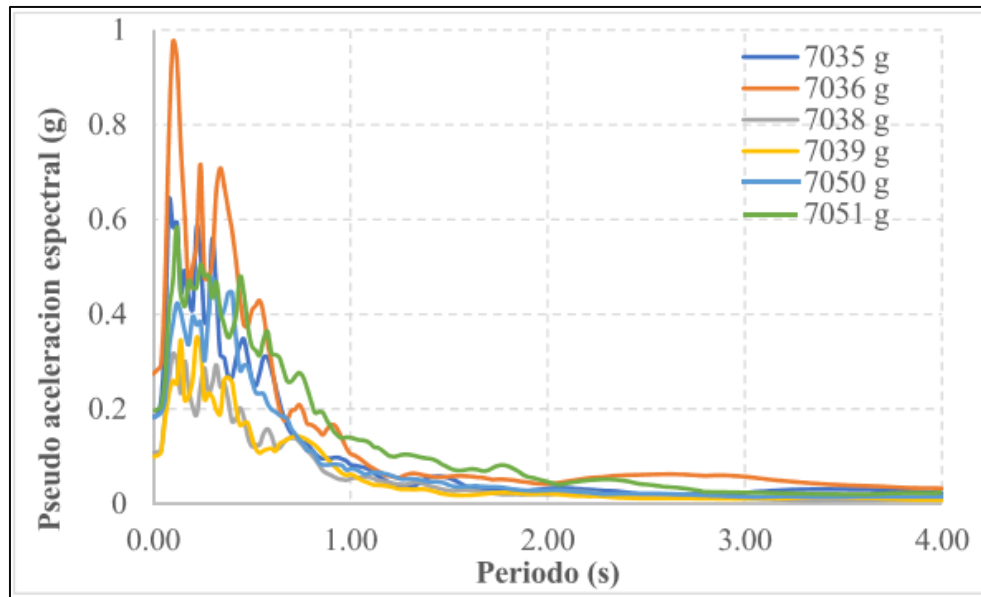
Tabla 15: Relación de registros sísmicos

| COD | FECHA | ENOMINACIÓN | DATA (Ptos) | DURACIÓN (s) | GA (cm/s ²) | PGA (g) | PGV (cm/s) | PGD (cm) |
|------|-----------|---------------|-------------|--------------|-------------------------|---------|------------|----------|
| 7035 | 17-Oct-66 | N82W | 3283 | 65.66 | -180.59 | 0.181 | 13.23 | 7.35 |
| 7036 | 17-Oct-66 | NO8E | 3282 | 65.64 | -269.34 | 0.27 | -21.6 | -16.6 |
| 7038 | 31-May-70 | N82W | 2259 | 45.18 | -104.82 | 0.11 | 4.71 | 1.55 |
| 7039 | 31-May-70 | NO8E | 2259 | 45.18 | -97.75 | 0.10 | 6.98 | 2.64 |
| 7050 | 03-Oct-74 | 1421 GCT NO8E | 4899 | 97.98 | 178.95 | 0.18 | 10.30 | -5.34 |
| 7051 | 03-Oct-74 | 1421 GCT NO8E | 4899 | 97.98 | -192.49 | 0.20 | 14.48 | 6.41 |

Fuente: Elaboración propia

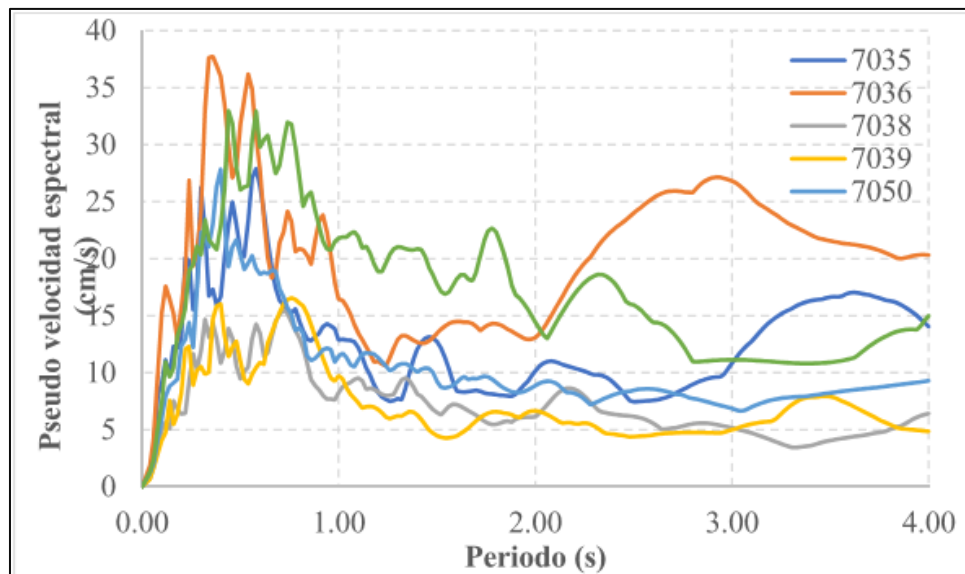
El terremoto más importante y utilizado en los diseños sísmicos es el registro del terremoto de Lima del 17 de octubre de 1966. Con una aceleración máxima de 269,34 cm/s², una velocidad de 21,6 cm/s y un desplazamiento de 16,3 cm, el registro tiene intervalos de tiempo de 0,02s. Se muestra el espectro de desplazamientos, velocidades y aceleraciones ficticias con una amortiguación del 5%.

Figura 12: Espectro de aceleraciones con 5% de amortiguamiento



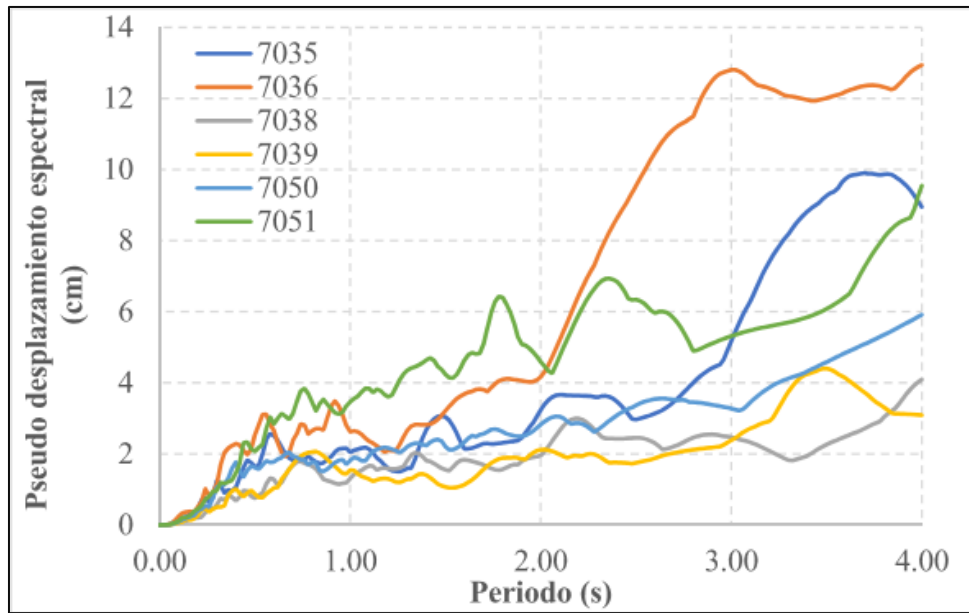
Fuente: Elaboración propia

Figura 13: Espectro de velocidades con 5% de amortiguamiento



Fuente: Elaboración propia

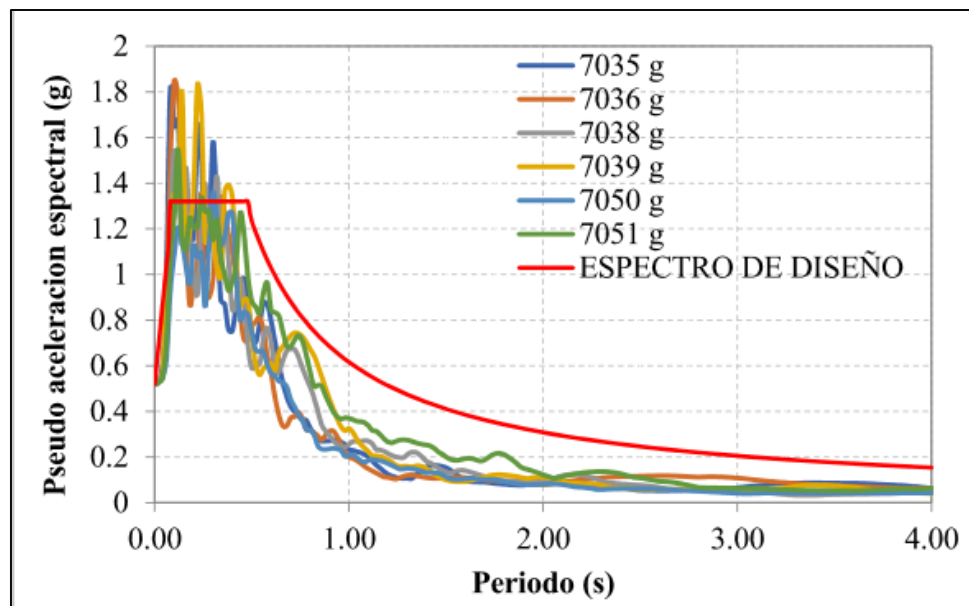
Figura 14: Espectro de desplazamientos con 5% de amortiguamiento



Fuente: Elaboración propia

Con un PGA de 0,24g y una probabilidad de superación del 7% durante una vida estructural de 75 años, los seis registros sísmicos se escalan.

Figura 15: Espectro de diseño



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan las conclusiones del análisis no lineal de la historia temporal de 6 datos sísmicos directos del puente poco estudiado.

Tabla 16: Respuesta para sismo longitudinal - Analisis Tiempo Historia

| Codigo de registro sísmico | Sismo Longitudinal | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|
| | Axial | Cortante | Momento |
| | Tn. | Tn. | Tn. |
| TH-7035 | 710.7 | 1,022.50 | 7,149.76 |
| TH-7036 | 710.68 | 994.23 | 7985.47 |
| TH-7038 | 710.68 | 1,003.54 | 8,047.17 |
| TH-7039 | 710.68 | 1,089.68 | 8,724.88 |
| TH-7050 | 710.72 | 1,030.53 | 8,260.28 |
| TH-7051 | 710.69 | 1,038.56 | 8,325.63 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Respuesta para sismo transversal - Analisis Tiempo Historia

| Codigo de registro sísmico | Sismo Longitudinal | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|
| | Axial | Cortante | Momento |
| | Tn. | Tn. | Tn. |
| TH-7035 | 710.69 | 1,158.85 | 6,472.85 |
| TH-7036 | 710.68 | 1,117.83 | 6,293.73 |
| TH-7038 | 710.69 | 1,177.35 | 6,460.66 |
| TH-7039 | 710.66 | 1,116.41 | 6,175.76 |
| TH-7050 | 710.68 | 1,322.02 | 7,285.05 |
| TH-7051 | 710.69 | 1,179.31 | 6,515.01 |

Fuente: Elaboración propia

También se muestran los desplazamientos máximos de la superestructura y la subestructura para terremotos longitudinales y transversales.

Tabla 18: Desplazamiento en el tablero en direccion X e Y

| Descripción | Desplazamiento en el C.G. del tablero | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------|
| | Sismo longitudinal | Sismo transversal |
| | Global X (cm) | Global Y (cm) |
| TH-7035 | 9.47 | 7.65 |
| TH-7036 | 9.31 | 7.50 |
| TH-7038 | 9.37 | 7.52 |
| TH-7039 | 10.16 | 7.23 |
| TH-7050 | 9.61 | 8.50 |
| TH-7051 | 9.70 | 7.63 |

Fuente: Elaboración propia

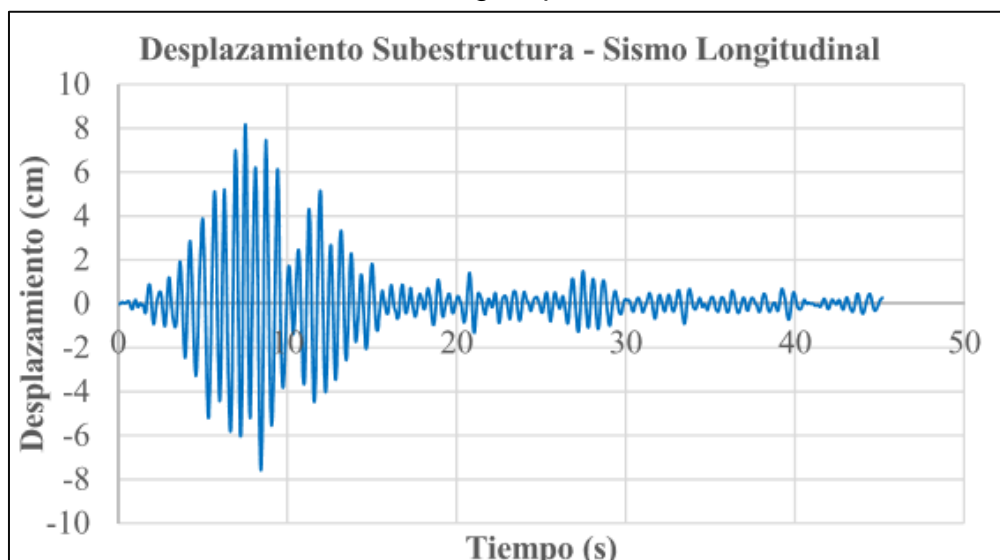
Tabla 19: Desplazamientos bajo el tablero en direccion X e Y

| Descripción | Desplazamiento nodo superior del pilar | |
|-------------|--|-------------------|
| | Sismo longitudinal | Sismo transversal |
| | Global X (cm) | Global Y (cm) |
| TH-7035 | 7.65 | 5.09 |
| TH-7036 | 7.51 | 4.98 |
| TH-7038 | 7.56 | 5.03 |
| TH-7039 | 8.2 | 4.83 |
| TH-7050 | 7.76 | 5.68 |
| TH-7051 | 7.83 | 5.09 |

Fuente: Elaboración propia

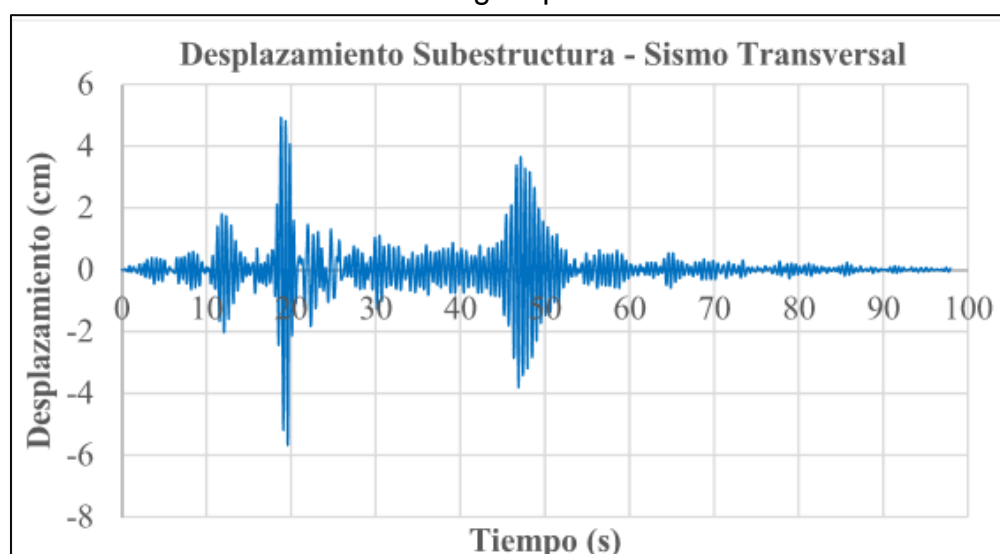
Se muestra un nodo de los desplazamientos de la subestructura a lo largo del tiempo. Se ha seleccionado el nodo con la designación 1850., las respuestas máximas de desplazamientos se dan con los acelerogramas de los sismos 7039 (31 de Mayo de 1970) en el sentido longitudinal y sismo 7050 (03 de Octubre 1974) para el sismo transversal.

Figura 16: Historia en el tiempo de desplazamientos longitudinales para la subestructura con base rígida para el sismo 7039



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Historia en el tiempo de desplazamientos transversales para la subestructura con base rígida para el sismo 7050



Fuente: Elaboración propia

4.2.3 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL PUSHOVER

El análisis Pushover estático no lineal pretende demostrar la creación secuencial de las rótulas plásticas para determinar la curva de capacidad del puente. Una vez elegido un rendimiento objetivo para la estructura en cuestión, que suele ser el funcionamiento completo tras el seísmo, se cumple el objetivo de un buen diseño

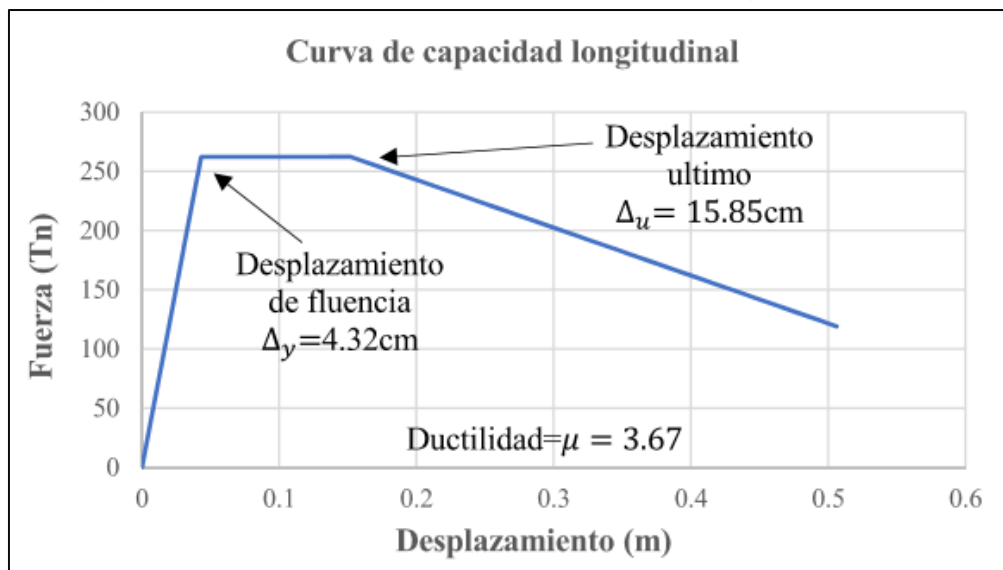
basado en el rendimiento. En consecuencia, el pilar del estribo debe ser elástico (sin cedencia).

En esencia, el proceso de diseño sísmico implica tres pasos: primero, determinar el nivel de rendimiento necesario durante el terremoto de diseño; segundo, estimar la demanda que el terremoto de diseño impone al puente; y tercero, confirmar que el puente tiene la capacidad necesaria para soportar esta demanda y proporcionar el nivel de rendimiento necesario.

ANÁLISIS LONGITUDINAL (EJE X)

La curva de capacidad en la dirección longitudinal del puente, examinada como un sistema de un grado de libertad, se representa en el modelo, que incorpora las rótulas plásticas relevantes del diseño.

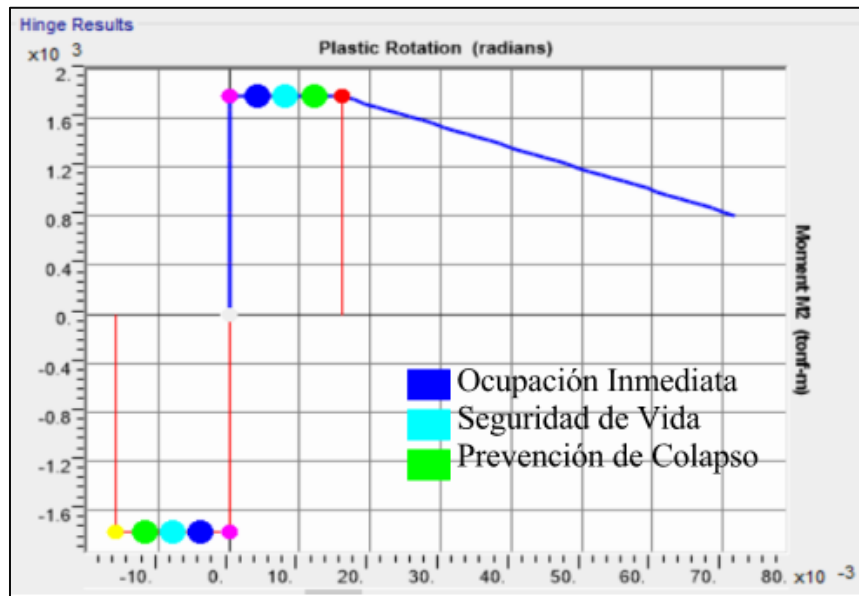
Figura 18: Curva de capacidad en el sentido longitudinal



Fuente: Elaboración propia

Para La mayor rotación plástica de la columna durante un $T_r=1000$ años en la dirección longitudinal del puente investigado es de 0,016 radianes, con un momento último de 1778,81 Tn-m.

Figura 19: Momento (Tn-m) vs rotación plástica (rad.) en el sentido longitudinal

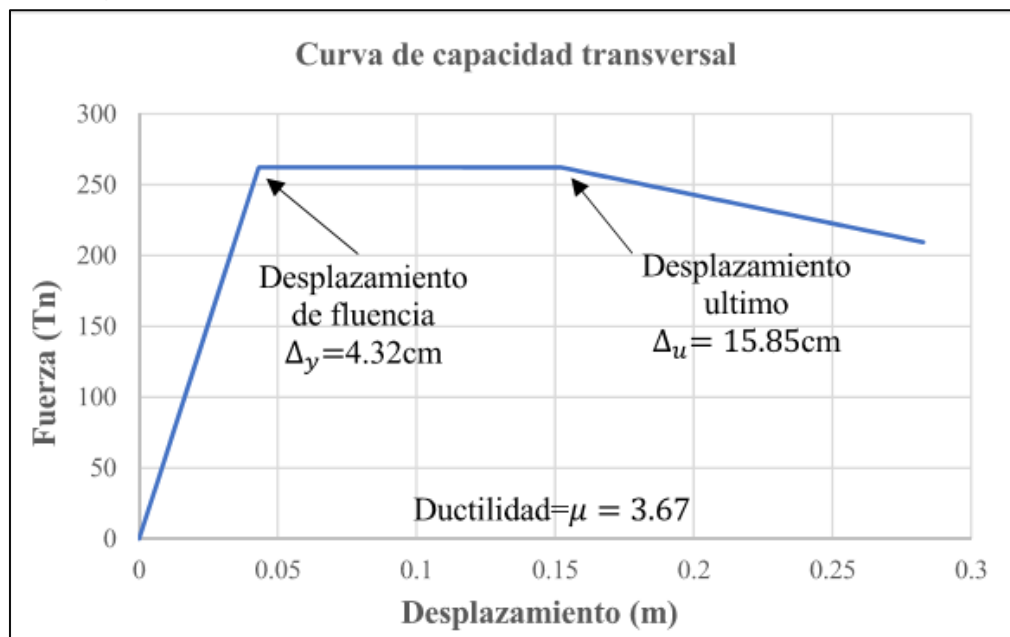


Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS TRANSVERSAL (EJE Y)

El proceso es similar en que la curva de capacidad se da en la dirección transversal del puente y se examina como un sistema de un grado de libertad, comparable al modelo longitudinal que tiene las rótulas plásticas apropiadas del diseño.

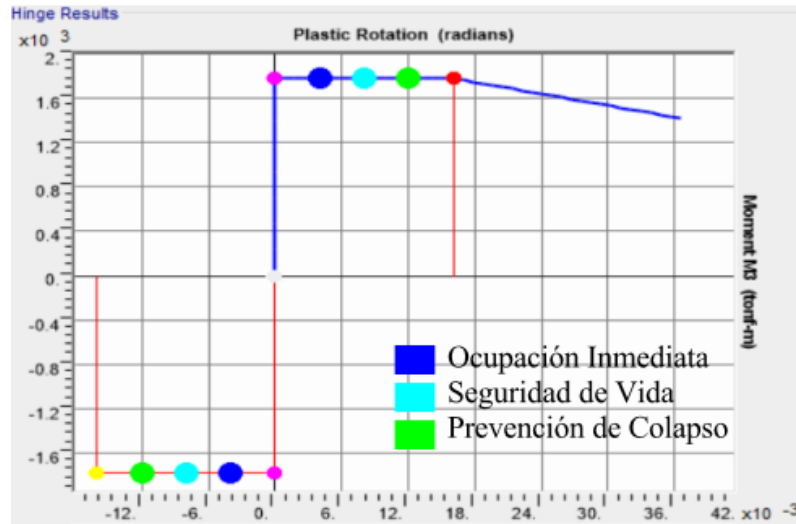
Figura 20: Curva de capacidad en el sentido transversal



Fuente: Elaboración propia

La mayor rotación plástica de la columna durante un Tr=1000 años en la dirección transversal del puente considerado es de 0,016 radianes, con un momento último de 1778,73 Tn-m.

Figura 21: Momento (Tn-m) vs rotación plástica (rad.) en el sentido transversal

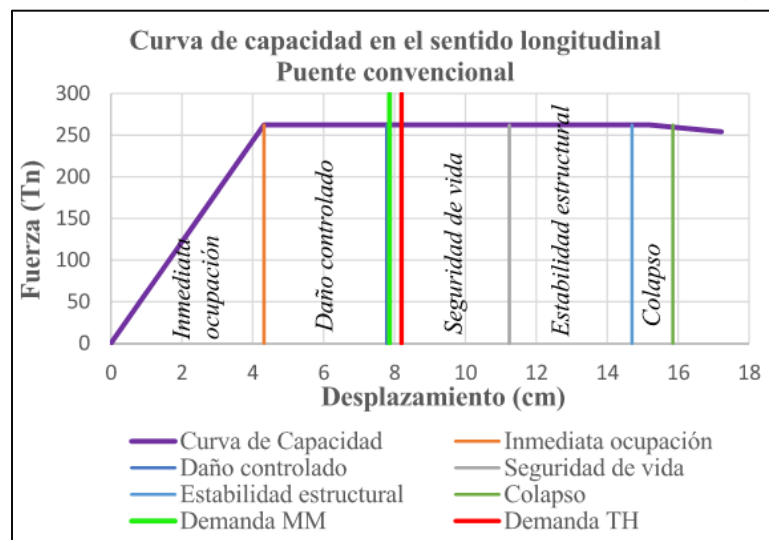


Fuente: Elaboración propia

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL PUENTE CONVENCIONAL

De acuerdo con la sectorización ATC-40 propuesta en el análisis del puente objeto de estudio, el nivel de prestaciones es "seguridad de la vida" y las demandas se determinan mediante el método espectral multimodal (Demanda MM) y el desplazamiento máximo de las seis simulaciones simuladas con el análisis no lineal tiempo-historia (Demanda TH).

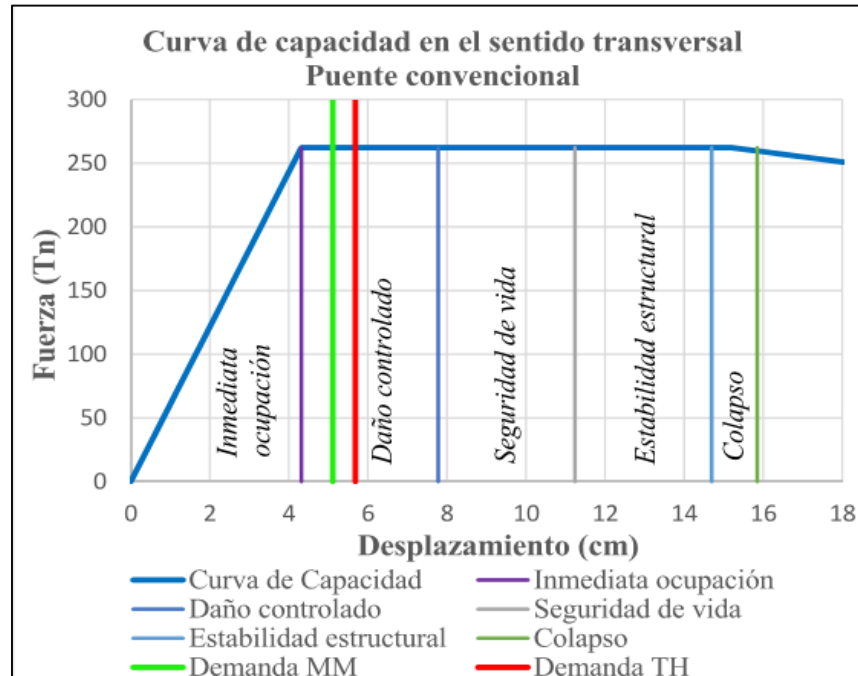
Figura 22: Sectorización de curva de capacidad para sismo longitudinal



Fuente: Elaboración propia

Según la sectorización sugerida por el ATC-40, el nivel de prestaciones es de daños controlados para el sismo de diseño en el eje “Y” del puente para una duración de retorno de 1000 años.

Figura 23: Sectorización de curva de capacidad para sismo transversal



Fuente: Elaboración propia

4.3 ANÁLISIS DE PUENTES AISLADOS

4.3.1 ANÁLISIS POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO

En el método racionalizado, se analiza iterativamente un modelo de puente de un grado de libertad con propiedades lineales equivalentes y amortiguadores viscosos para representar los aisladores, a fin de obtener estimaciones del desplazamiento de la superestructura (d_{isol}) y las propiedades necesarias de cada aislador para proporcionar el rendimiento requerido.

a. PROPIEDADES DEL AISLADOR

Con los datos del puente como el peso de la superestructura incluyendo el peso permanente, en el apoyo intermedio es de 580.017 Tn. los que divididos entre 4 aisladores tenemos una carga axial de 145.00Tn.

Tabla 20: Elección del dispositivo aislador “LRB”

| DESCRIPCIÓN DE PARÁMETRO DEL AISLADOR | |
|--|------|
| Diámetro del aislador, Do (cm) | 57 |
| Diámetro del núcleo de plomo, Di (cm) | 10 |
| Numero de capas de goma, (Und) | 24 |
| Espesor de capa de goma, tr (cm) | 0.5 |
| Espesor de capa de acero, ts (cm) | 0.2 |
| Longitud de placa cuadrada, L (cm) | 62 |
| Espesor de placa, t (cm) | 2.5 |
| Numero de pernos, (und) | 8 |
| Diámetro de perno, (Ø) | 2.7 |
| Espesor total de goma natural, Tr=Σtr (cm) | 12 |
| Altura total del aislador, H (cm) | 21.6 |

Fuente: Elaboración propia

Las características generales del sistema de aislación sísmica del puente se determinan de la siguiente manera.

1. Módulo de corte de la goma:

$$G = 0.413 \text{ Mpa}$$

$$G_L = 10 \text{ Mpa}$$

2. Rigidez post elástica del sistema para 12 aisladores

$$K_d = \frac{r}{r} \frac{\pi * (D_0^2 - D_i^2)}{4 * T_r}$$

$$K_d = 10,214.39 \text{ KN/m}$$

$$K_d = 10,4212.23 \text{ Kg/cm}$$

3. Resistencia característica del sistema para aisladores

$$Q_d = L G_L \frac{\pi * D_i^2}{4} * G_L$$

$$Q_d = 96.07 \text{ Tn}$$

4. Desplazamiento de fluencia

$$Y = 0.0254 \text{ m}$$

b. DESPLAZAMIENTO INICIAL DEL SISTEMA

Se asume que el período de aislamiento efectivo, T_{eff} , de 1.0 segundo, tomar la relación de amortiguamiento viscoso, ξ , para que sea del 5% y calcular el desplazamiento mediante la ecuación. (El factor de amortiguamiento, B_L , se asume igual a 1.0 en este caso), S_{D1} es igual a 0.616.

$$d = \frac{24.87 * S_{D1} * T_{eff}}{B_L}$$

$$d = 15.32 \text{ cm}$$

Después de hacer varias iteraciones, el desplazamiento de la estructura es de 17.50 cm.

el peso de la superestructura, incluidas las cargas permanentes es:

| | |
|-------------------------------|----------------|
| $W_{SS} = 943.529 \text{ Tn}$ | 943,529.40 Kg |
| $W_1 = 181.756 \text{ Tn}$ | 181,756.00 Kg |
| $W_2 = 580.017 \text{ Tn}$ | 580,017.40 Kg |
| $W_3 = 181.756 \text{ Tn}$ | 181, 756.00 Kg |

Peso del pilar (viga y columna) participante, $W_{PP} = 130.912.70 \text{ Kg}$

Peso efectivo (para el calculo del periodo), $W_{eff} = W_{SS} + W_{PP} = 1074.44 \text{ Tn}$

Rigide del pilar en la dirección longitudinal:

$$K_{sub, pilar.long} = 112,915.33 \text{ kg/cm}$$

Rigidez del pilar en la dirección transversal:

$$K_{sub, pilar.tran} = 155,391.41 \text{ kg/cm}$$

Seguidamente, calculamos la resistencia característica, $Q_{d,j}$ y la rigidez elastica posterior, $K_{d,j}$, del sistema de aislamiento en cada soporte 'j' distribuyendo los valores de resistencia calculada total, Q_d y rigidez, K_d , en proporción a la carga muerta aplicada en ese apoyo:

$$Q_{d,j} = Q_d \frac{W_j}{W}$$

$$K_{d,j} = K_d \frac{W_j}{W}$$

$$Q_d, \quad 18.51 \text{ Tn} \quad 18,506.98 \text{ kg}$$

$$K_{d,1} = 2,005.75 \text{ kg/cm}$$

$$Q_{d,2} \quad 59.06 \text{ Tn} \quad 59,059.22 \text{ kg}$$

$$K_{d,2} = 6,400.73 \text{ kg/cm}$$

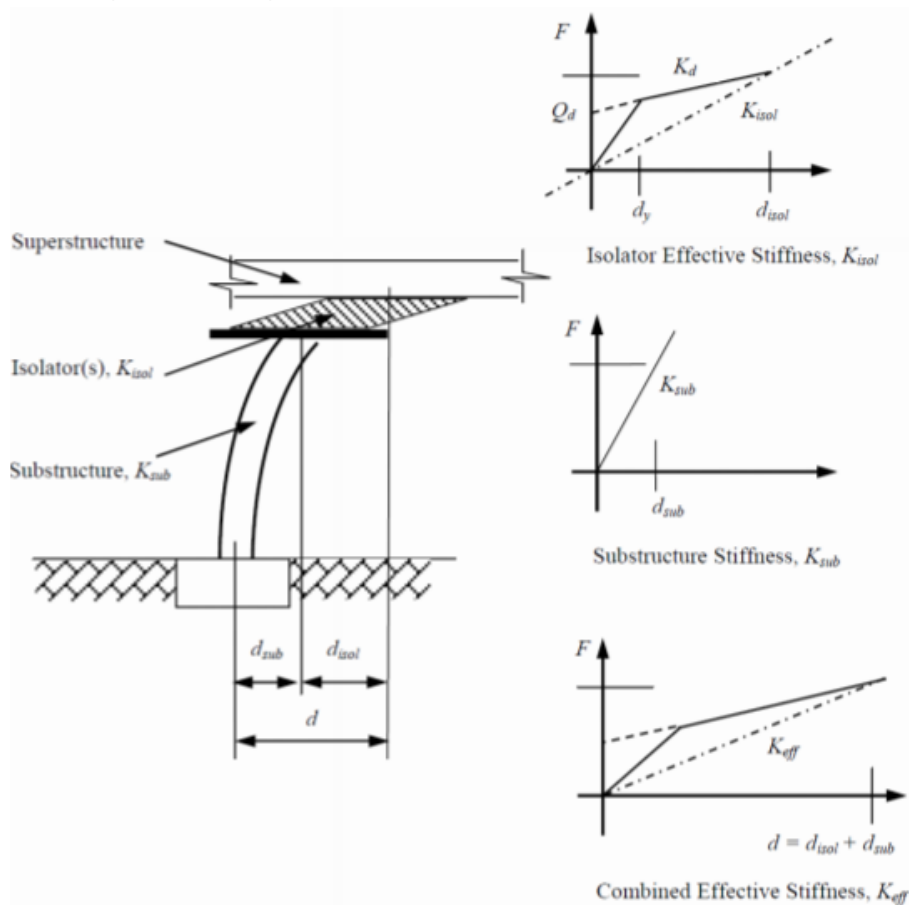
$$Q_{d,3} = 18.51 \text{ Tn} \quad 18,506.98 \text{ kg}$$

$$K_{d,3} = 2,005.75 \text{ kg/cm}$$

c. RIGIDEZ EFECTIVA DEL SISTEMA COMBINADO DE PILAR Y AISLADOR

Calcule la rigidez efectiva, $K_{eff,j}$, de cada soporte 'j' para todos los soportes, teniendo en cuenta la rigidez de los aisladores en el soporte 'j' ($K_{isol,j}$) y la rigidez de la subestructura $K_{sub,j}$, cómo se puede apreciar la siguiente figura.

Figura 24: Rigidez efectiva del sistema pilar y aislador



Fuente: (Buckle et al., 2006)

$$\alpha_j = \frac{K_{d,j} + Q_{d,j}}{K_{sub,j}d - Q_{d,j}}$$

$$\alpha_1 = 0.027385592$$

$$\alpha_2 = 0.089241291$$

$$\alpha_3 = 0.027385592$$

$$K_{eff,j} = \frac{\alpha_j K_{sub,j}}{1 + \alpha_j}$$

$$K_{eff,1} = 3,009.83 \text{ kg/cm Estribo Norte}$$

$$K_{eff,2} = 9,251.13 \text{ kg/cm Pilares}$$

$$K_{eff,3} = 3,009.83 \text{ kg/cm Estribo Sur}$$

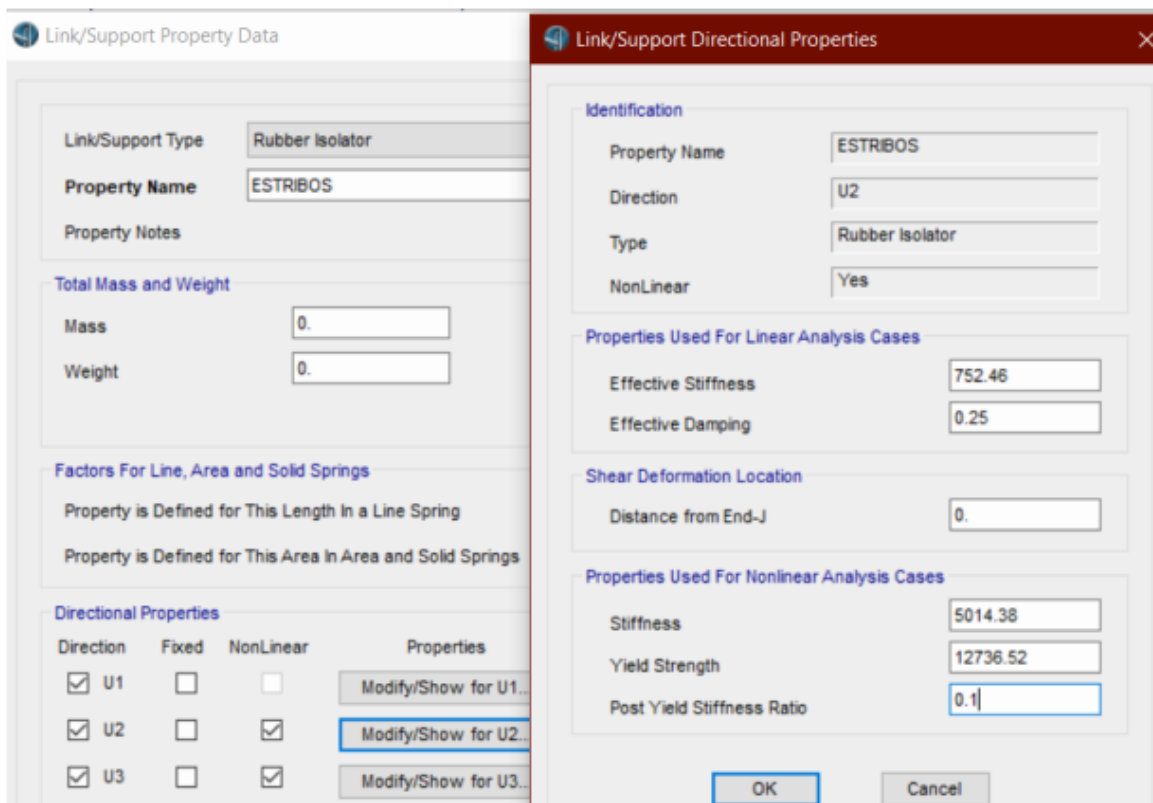
d. VERIFICACIÓN DE CONVERGENCIA

Dado que el valor calculado para el desplazamiento, $d = 17.50\text{cm}$ está cerca del supuesto al comienzo del ciclo, $d = 17.50\text{cm}$, este valor se calculó haciendo varias iteraciones, alcanzándose la convergencia con un desplazamiento de la superestructura de 17.50cm , con un período efectivo de $1,683$ segundos y un factor de amortiguamiento de $1,47$ (relación de amortiguamiento del 18.18%).

4.3.2 ANÁLISIS ESPECTRAL MULTIMODAL (MM)

Las características de apoyo direccional establecidas son coherentes con los resultados del cálculo realizado mediante el método acelerado descrito en la sección anterior.

Figura 25: Definición de aisladores en los estribos norte y sur



Fuente: Elaboración propia

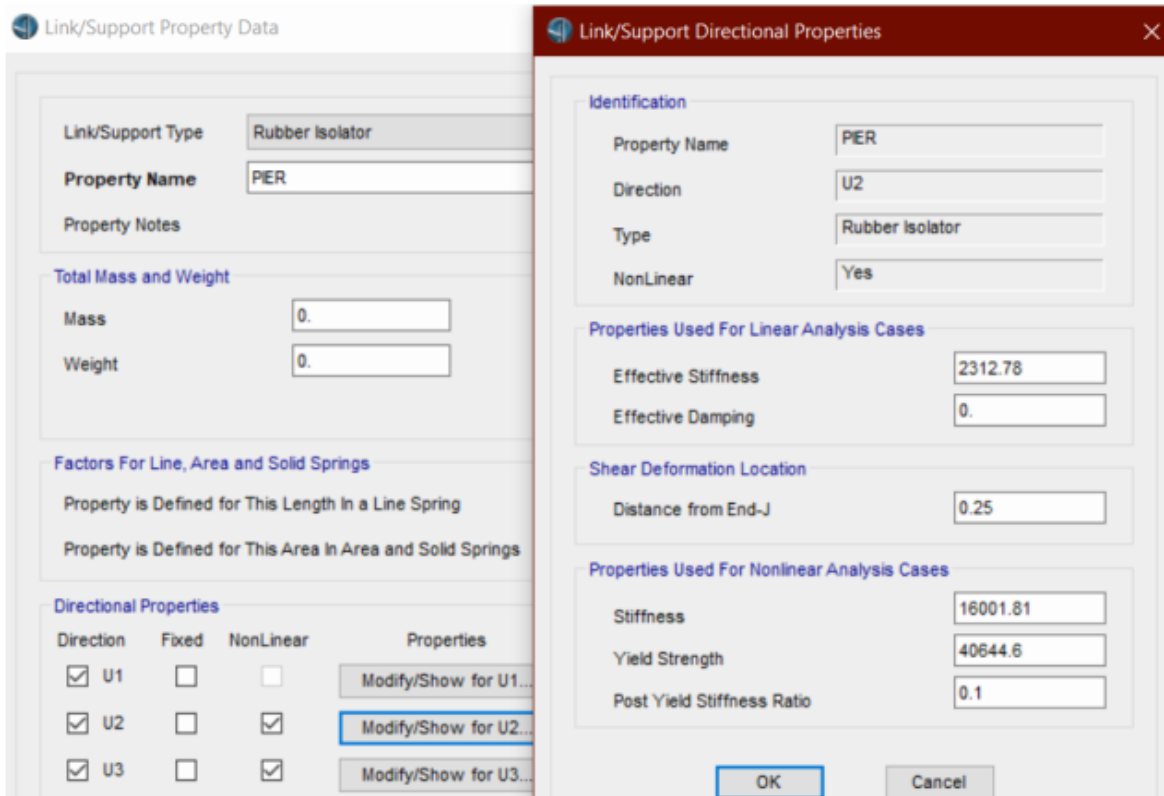
Para crear el modelo se utilizó el sistema de aislamiento de tipo LRB, el cual cuenta con un sistema de disipación según catálogos del 25%, entre cada oscilación.

Tabla 21: Propiedades de los aisladores en el pilar requeridas por el programa CSIBridge v21

| Propiedades en el pilar | Para 4 Aisladores | Para 1 Aisladores |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Rigidez elástica K_U (kg/cm) | 64,007.25 | 16,001.81 |
| Rigidez post-elástica k_d (kg/cm) | 6,400.73 | 1,600.18 |
| Rigidez efectiva K_{eff} (kg/cm) | 9,251.13 | 2,312.78 |
| Ratio de la rigidez post fluencia | 0.10 | 0.10 |
| Desplazamiento de fluencia d_y (cm) | 2.54 | 2.54 |
| Fuerza de fluencia F_y (kg) | 162,578.42 | 40,644.60 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Definición de aisladores en el pilar con propiedades no lineales en CSIBridge V21



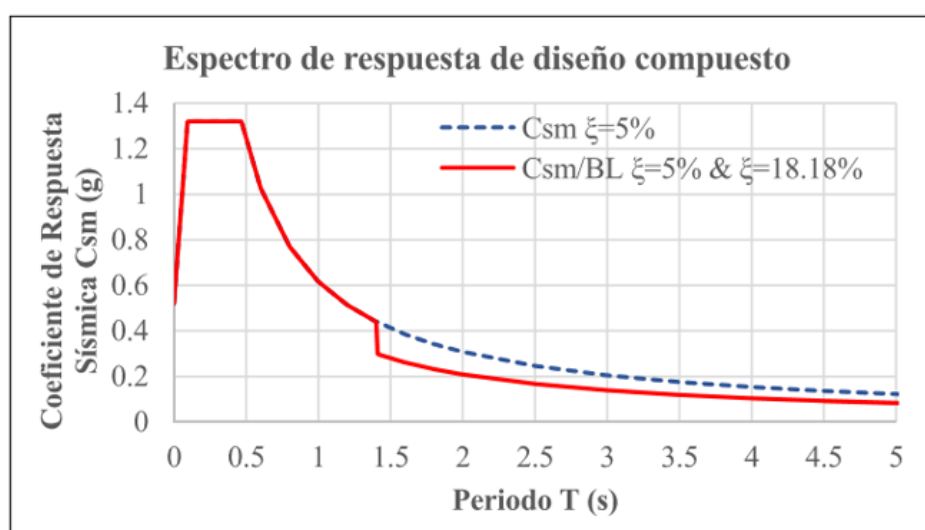
Fuente: Elaboración propia

a. ESPECTRO DE RESPUESTA DE DISEÑO COMPUESTO

El espectro de respuesta "compuesto". es para un sistema amortiguado al 5%. Se modifica en este paso para permitir una mayor amortiguación en los modos fundamentales de vibración introducidos por los aisladores. Esto se hace dividiendo todos los valores de aceleración espectral en períodos por encima de 0,8 veces el período efectivo del puente, T_{eff} , por el factor de amortiguación, B_L .

De los resultados finales del Método Simplificado $B_L = 1.473$ y $T_{eff} = 1.683$ seg. Por lo tanto, la transición en el espectro compuesto de 5% a 18.18% de amortiguación ocurre a $0.8 T_{eff} = 0.8 (1.683) = 1.344$ seg. El espectro se obtiene del 5% del espectro de la figura 47, al dividir todos los valores de aceleración con períodos ≥ 1.344 seg por 1.473.

Figura 27: Espectro de diseño combinado



Fuente: Elaboración propia

b. ANÁLISIS MULTIMODAL DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Los resultados muestran los periodos de moderación y los factores de participación de la masa para las 12 primeras modalidades. Los dos primeros modos son los modos principales longitudinal y transversal con períodos de 1.61 y 1.60 segundos respectivamente. El período del modo longitudinal (1.61seg) es cercano al calculado en el Método simplificado (1.68seg).

Tabla 22: Propiedades de los aisladores

| Modo | Periodo (s) | UX | UY | UZ | Suma UX | Suma UY | Suma UZ |
|------|-------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 1 | 1.618 | 0.899 | 0.000 | 0.000 | 0.899 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 1.605 | 0.000 | 0.895 | 0.000 | 0.899 | 0.895 | 0.000 |
| 3 | 1.472 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.899 | 0.895 | 0.000 |
| 4 | 0.256 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.899 | 0.895 | 0.000 |
| 5 | 0.182 | 0.000 | 0.000 | 0.714 | 0.899 | 0.895 | 0.714 |
| 6 | 0.159 | 0.000 | 0.02 | 0.000 | 0.899 | 0.915 | 0.714 |
| 7 | 0.15 | 0.086 | 0.000 | 0.000 | 0.985 | 0.915 | 0.714 |
| 8 | 0.149 | 0.000 | 0.01 | 0.000 | 0.985 | 0.924 | 0.714 |
| 9 | 0.098 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.985 | 0.924 | 0.714 |
| 10 | 0.083 | 0.000 | 0.054 | 0.000 | 0.985 | 0.979 | 0.714 |
| 11 | 0.079 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.985 | 0.979 | 0.714 |
| 12 | 0.07 | 0.000 | 0.000 | 0.039 | 0.985 | 0.979 | 0.753 |

Fuente: Elaboración propia

Los valores calculados para los desplazamientos del aislador debido a un terremoto longitudinal son los siguientes:

$$d_{isol,1} = 16.98 \text{ (17.03)cm Estribo Norte}$$

$$d_{isol,2} = 16.95 \text{ (16.07)cm Pilar}$$

$$d_{isol,3} = 16.98 \text{ (17.03)cm Estribo Sur}$$

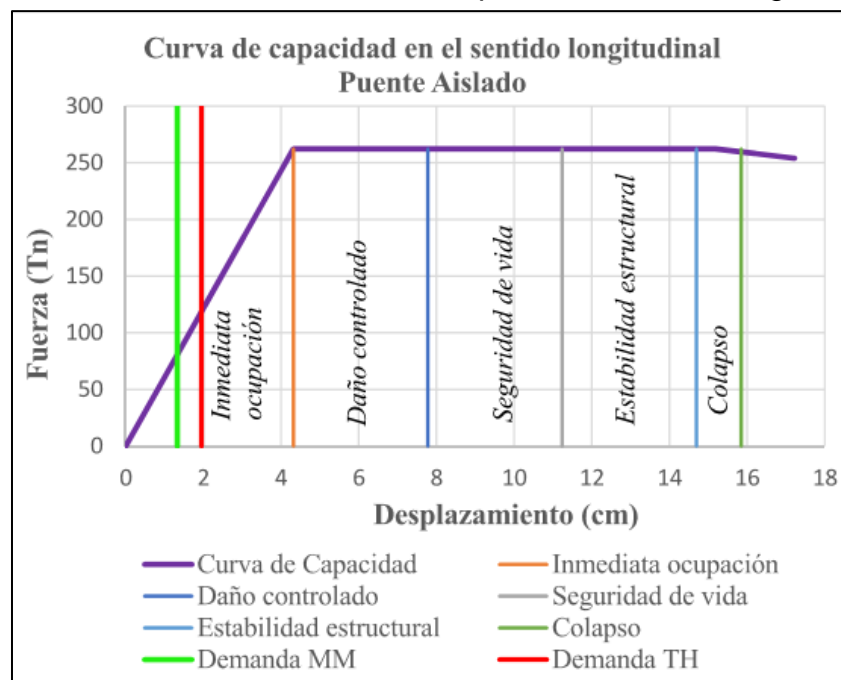
c. VERIFICACIÓN DE CONVERGENCIA

El desplazamiento de la superestructura es menos de un 1% de diferencia del desplazamiento asumido que es igual al calculado por el método simplificado.

4.3.3 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL PUSHOVER

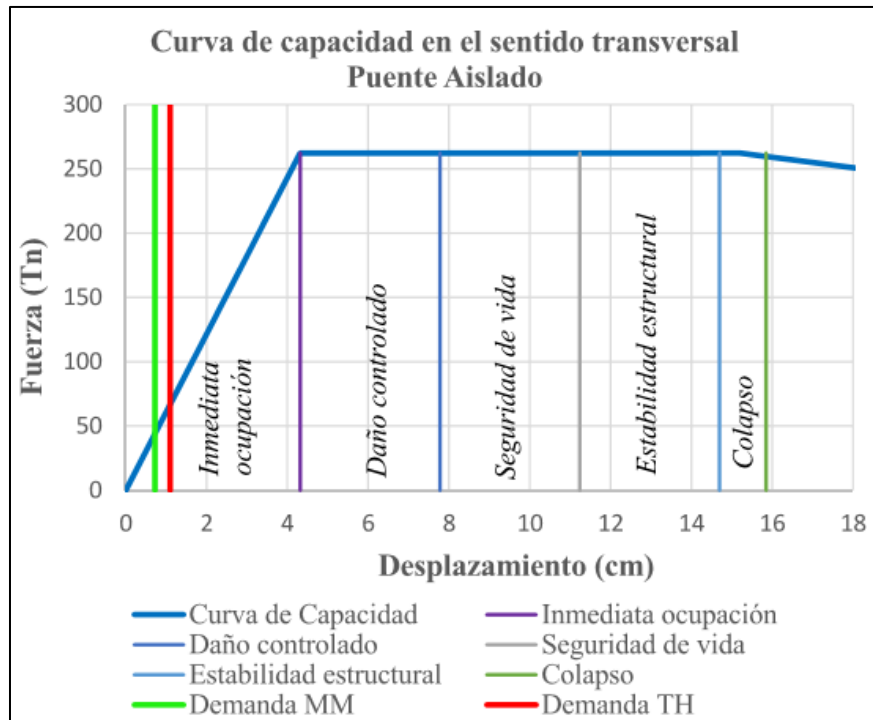
Para el sismo de diseño en las direcciones longitudinal (eje X) y transversal (eje Y) con un periodo de retorno de 1000 años, se muestra el análisis del puente con aislamiento sísmico y se determina que el nivel de desempeño es de "ocupación inmediata" de acuerdo con la sectorización de la curva de capacidad según los daños propuestos por el ATC-40.

Figura 28: Sectorización de la curva de capacidad el sismo longitudinal



Fuente: Elaboración propia

Figura 29: Sectorización de la curva de capacidad para el sismo transversa



Fuente: Elaboración propia

4.4 COMPARACIÓN DE LOS PERIODOS Y VIBRACIONES MODALES

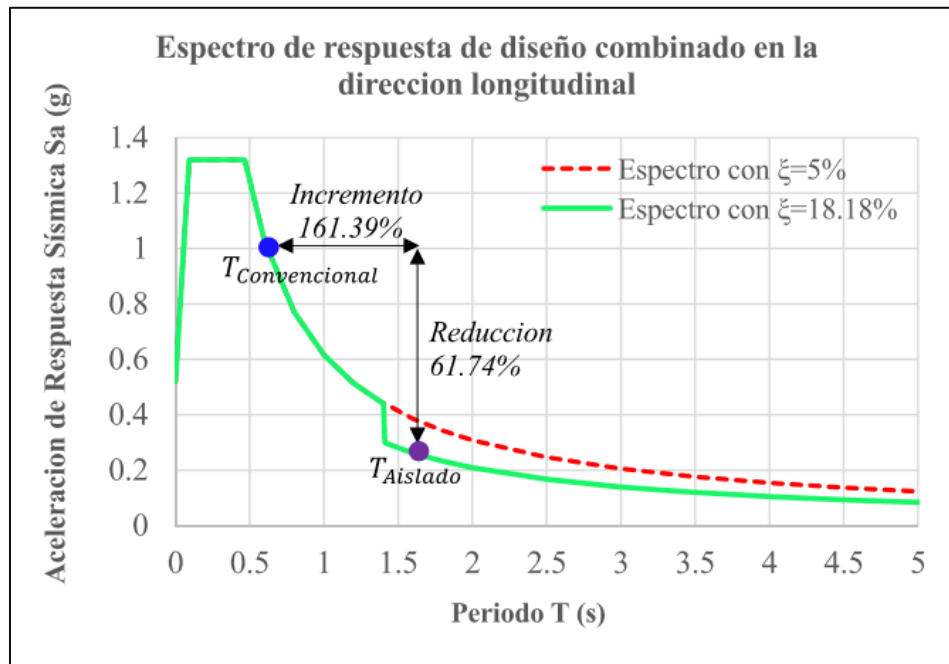
El periodo fundamental del puente aislado presenta un aumento del 161,39% en comparación con el periodo fundamental del puente convencional, según el análisis espectral multimodal en la dirección longitudinal (eje X). Asimismo, existe una reducción de la aceleración de respuesta sísmica en un 61.74%.

Tabla 23: Comparación del periodo fundamental en la dirección longitudinal del puente convencional y aislado

| DESCRIPCIÓN | PERIODO (T) | ACELERACIÓN (Sa) |
|---------------------------------------|-------------|------------------|
| Análisis multimodal – Convencional | 0.619 s | 0.996 g |
| Análisis multimodal – Aislado | 1.618 s | 0.381 g |
| Ratio periodo Aislado / Convencional | 2.614 s | 0.383 g |
| Incremento del periodo fundamental | 161.39 % | - |
| Reducción de la aceleración espectral | - | 61.74% |

Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Comparación de respuestas de periodos y aceleración espectral en la dirección longitudinal del puente



Fuente: Elaboración propia

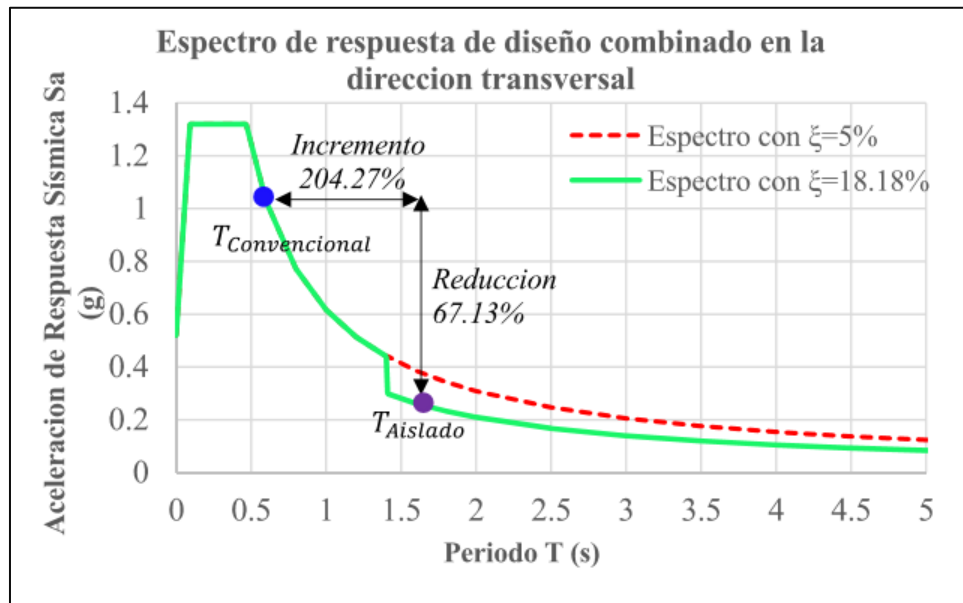
Para la dirección transversal (eje Y), hemos descubierto que el periodo fundamental del puente aislado es un 204,27% mayor que el periodo fundamental del puente convencional. Además, se ha producido una reducción del 67,13% en la aceleración de la respuesta sísmica. Esta respuesta sísmica se preveía porque los aisladores proporcionan flexibilidad estructural a través de la dispersión de energía.

Tabla 24: Comparación del periodo fundamental en la dirección transversal del puente convencional y aislado

| DESCRIPCIÓN | PERIODO (T) | ACELERACIÓN (Sa) |
|---------------------------------------|-------------|------------------|
| Análisis multimodal – Convencional | 0.528 s | 1.168 g |
| Análisis multimodal – Aislado | 1.605 s | 0.384 g |
| Ratio periodo Aislado / Convencional | 3.043 s | 0.329 g |
| Incremento del periodo fundamental | 204.27 % | - |
| Reducción de la aceleración espectral | - | 67.13% |

Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Comparación de respuestas de periodos y aceleración espectral en la dirección transversal del puente



Fuente: Elaboración propia

4.5 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS

4.5.1 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS POR EL MÉTODO ESPECTRAL MULTIMODAL

La tabla siguiente ofrece un resumen de la respuesta al desplazamiento del puente tradicional y del aislado utilizando el enfoque del análisis espectral multimodal.

Tabla 25: Comparación de desplazamientos del puente con y sin aislamiento sísmico, para el análisis espectral multimodal

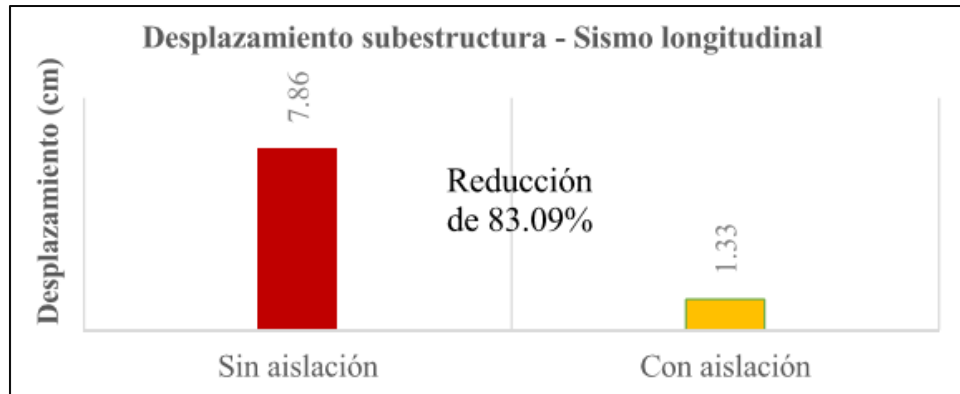
| DESCRIPCIÓN | Conven cional | Aislado | Ratio |
|--|------------------|---------|-------|
| Sismo Longitudinal | | | |
| Desplazamiento máximo subestructura (cm) | 7.858 | 1.329 | 0.17 |
| Desplazamiento máximo superestructura (cm) | 9.734 | 16.972 | 1.74 |
| Sismo Transversal | | | |
| Desplazamiento máximo subestructura (cm) | 5.113 | 0.724 | 0.14 |
| Desplazamiento máximo superestructura (cm) | 7.667 | 16.782 | 2.19 |

Fuente: Elaboración propia

La variación de la respuesta en cuanto a los desplazamientos obtenidos en la subestructura, en ambas direcciones de análisis se tienen una reducción importante

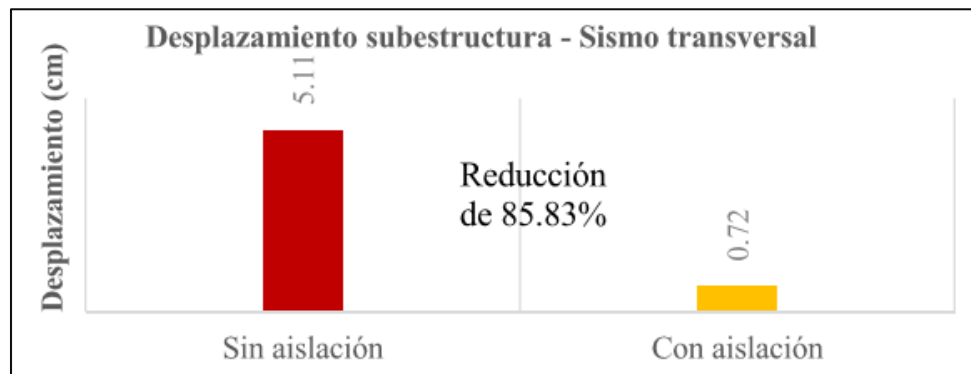
mayores al 83% de desplazamiento del puente convencional respecto al puente con aislación sísmica.

Figura 32: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método multimodal espectral



Fuente: Elaboración propia

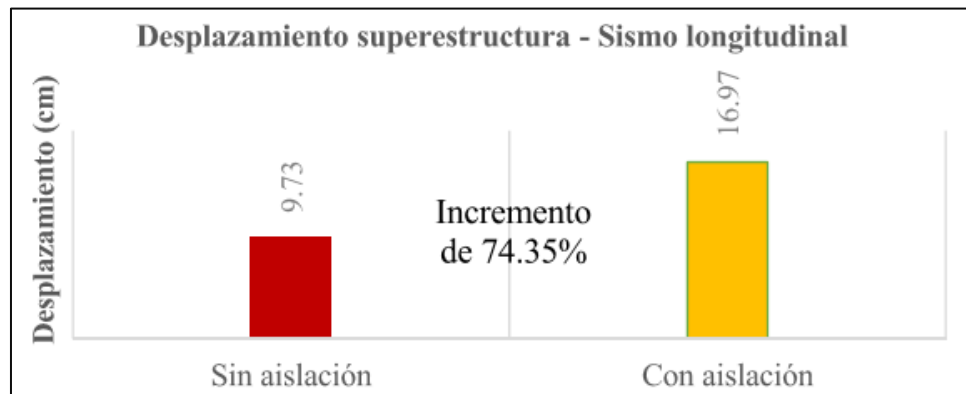
Figura 33: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método multimodal espectral



Fuente: Elaboración propia

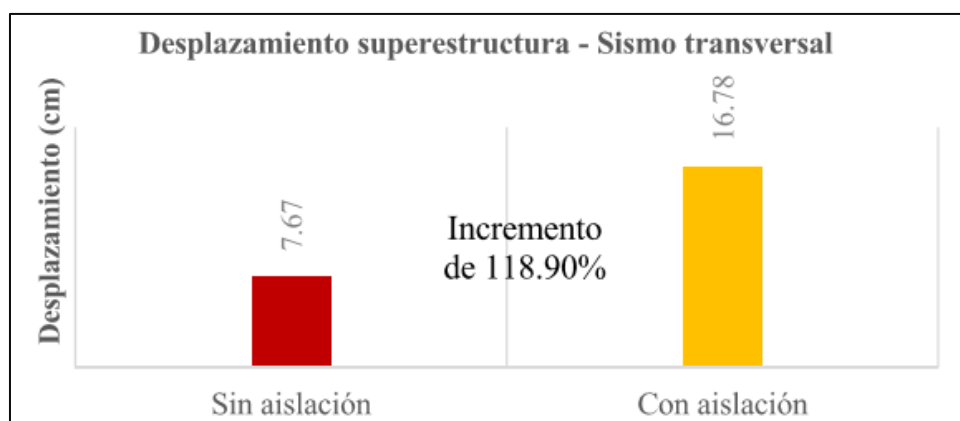
la variación de la respuesta sísmica de los desplazamientos calculados en la superestructura, en ambas direcciones de análisis se tienen un incremento mayor al 74% de desplazamiento del puente asilado respecto al puente convencional debido a la deformación del aislador.

Figura 34: Comparación de desplazamiento de la superestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método multimodal espectral



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Comparación de desplazamiento de la superestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método multimodal espectral

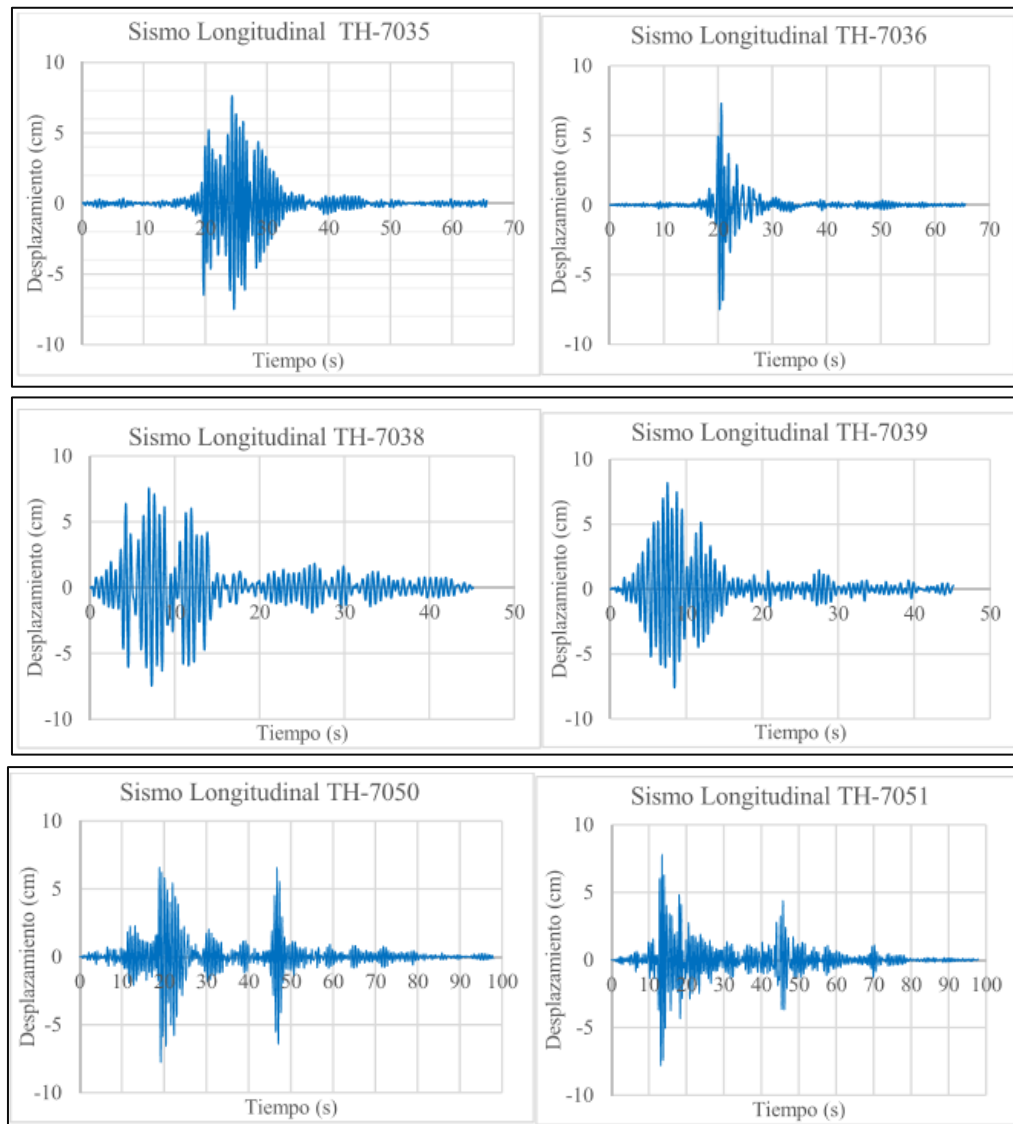


Fuente: Elaboración propia

4.5.2 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS POR EL MÉTODO TIEMPO-HISTORIA

Las siguientes figuras y tablas muestran que las respuestas de desplazamiento máximo para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, son los terremotos TH-7039 y TH-7050, respectivamente, basados en aceleraciones basales de seis (6) registros a escala para un periodo de retorno de 1000 años.

Figura 36: Historia del desplazamiento longitudinal en el tiempo para el puente convencional para los seis casos de sismos en estudio.



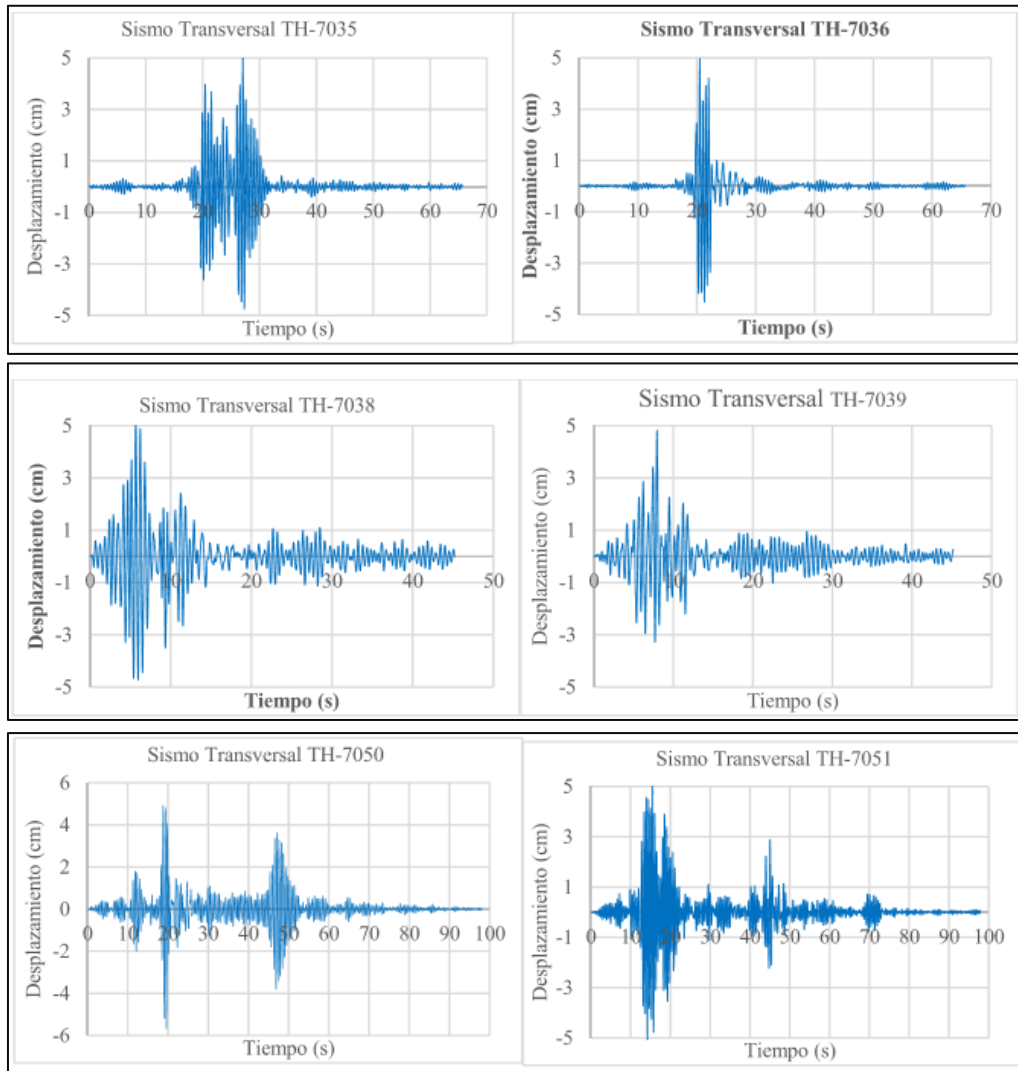
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Comparación de desplazamientos del puente con y sin aislamiento sísmico, para el análisis no lineal tiempo historia

| DESCRIPCIÓN | Convencional | Aislado | Ratio |
|--|--------------|---------|-------|
| Sismo Longitudinal | | | |
| Desplazamiento máximo subestructura (cm) | 8.20 | 1.69 | 0.21 |
| Desplazamiento máximo superestructura (cm) | 10.16 | 14.66 | 1.44 |
| Sismo Transversal | | | |
| Desplazamiento máximo subestructura (cm) | 5.68 | 1.10 | 0.19 |
| Desplazamiento máximo superestructura (cm) | 8.5 | 14.77 | 1.74 |

Fuente: Elaboración propia

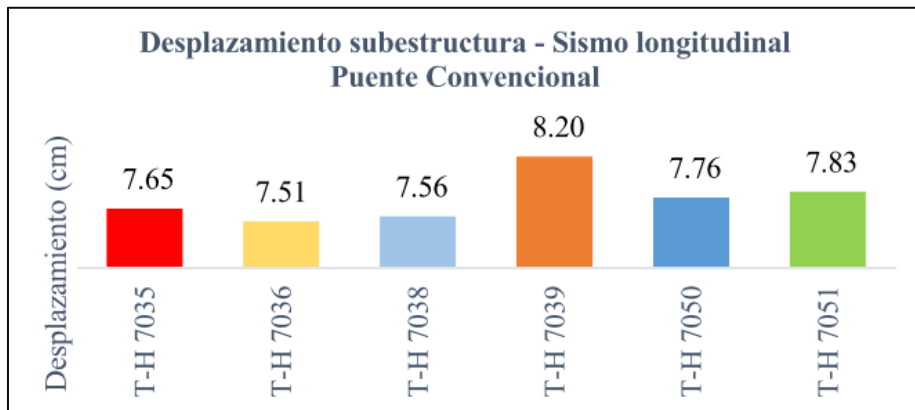
Figura 37: Historia del desplazamiento transversal en el tiempo para el puente convencional para los seis casos de sismos en estudio.



Fuente: Elaboración propia

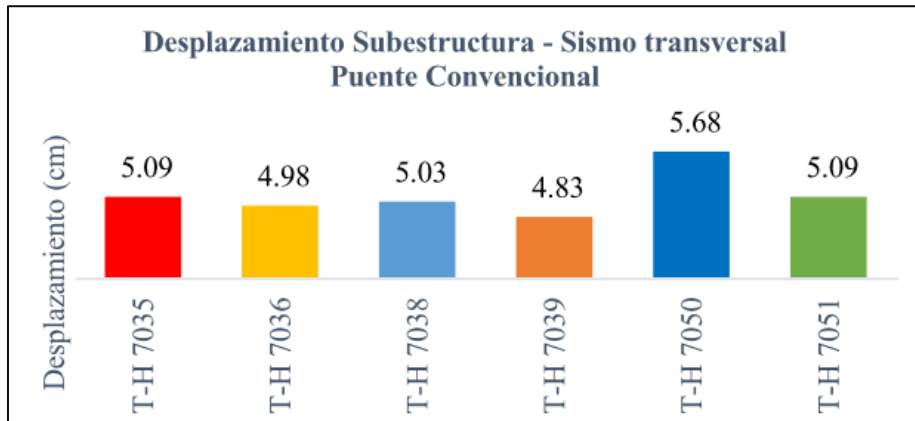
En los gráficos se muestran los resultados del análisis dinámico no lineal para los seis escenarios sísmicos estudiados para las direcciones longitudinal y transversal del puente convencional y aislado.

Figura 38: Desplazamiento de la subestructura en el sentido longitudinal del puente convencional por el método de análisis no lineal tiempo historia.



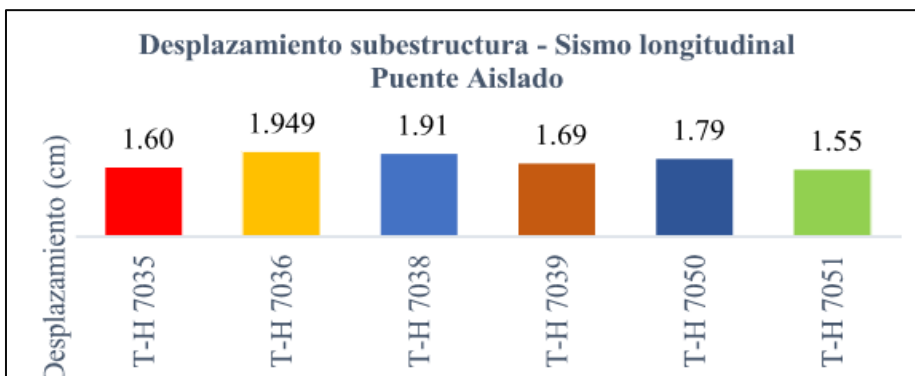
Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Desplazamiento de la subestructura en el sentido transversal del puente convencional por el método de análisis no lineal tiempo historia.



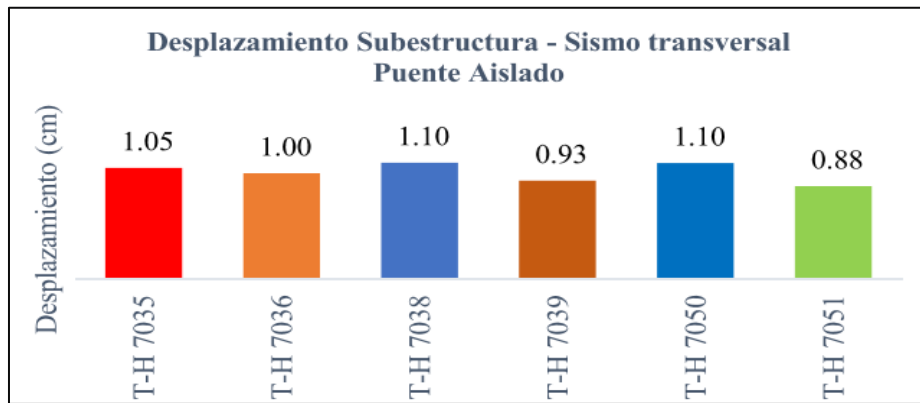
Fuente: Elaboración propia

Figura 40: Desplazamiento de la subestructura en el sentido longitudinal del puente aislado por el método de análisis no lineal tiempo historia.



Fuente: Elaboración propia

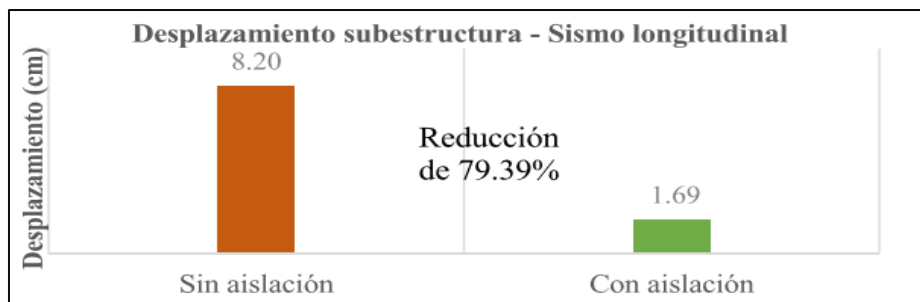
Figura 41: Desplazamiento de la subestructura en el sentido transversal del puente aislado por el método de análisis no lineal tiempo historia.



Fuente: Elaboración propia

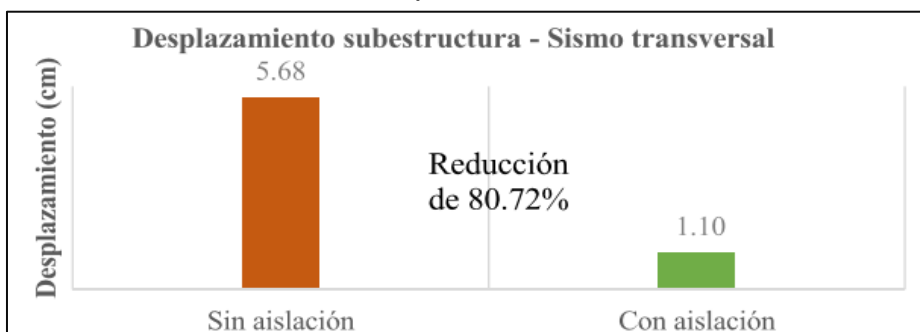
El desplazamiento del puente convencional se reduce en más de un 79% en comparación con el puente con aislamiento sísmico, según la variación del estudio de la respuesta del desplazamiento en ambas direcciones.

Figura 42: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de análisis no lineal tiempo historia.



Fuente: Elaboración propia

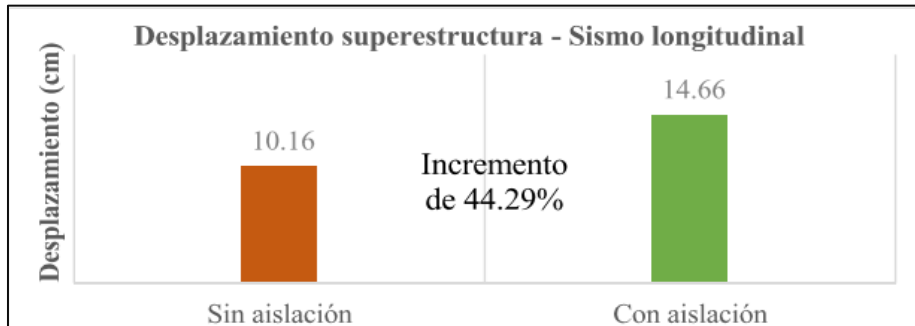
Figura 43: Comparación de desplazamiento de la subestructura del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de análisis no lineal tiempo historia.



Fuente: Elaboración propia

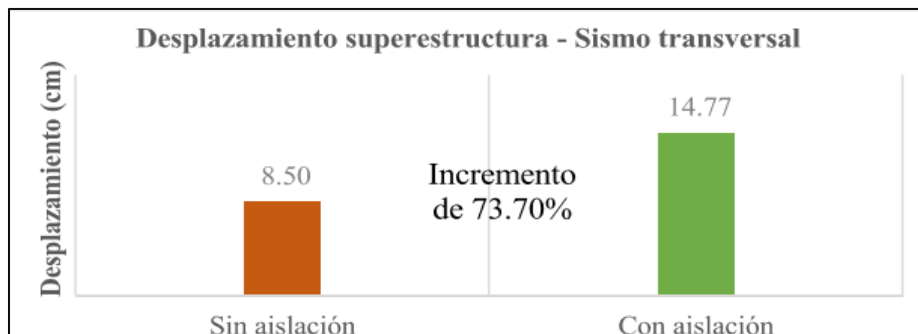
se representa la variación de la respuesta sísmica de los desplazamientos calculados en la superestructura, en ambas direcciones de análisis se tienen un incremento mayor al 44% de desplazamiento del puente aislado respecto al puente convencional debido a la deformación del aislador.

Figura 44: Desplazamiento de la superestructura para el sismo longitudinal por el método de análisis no lineal TH.



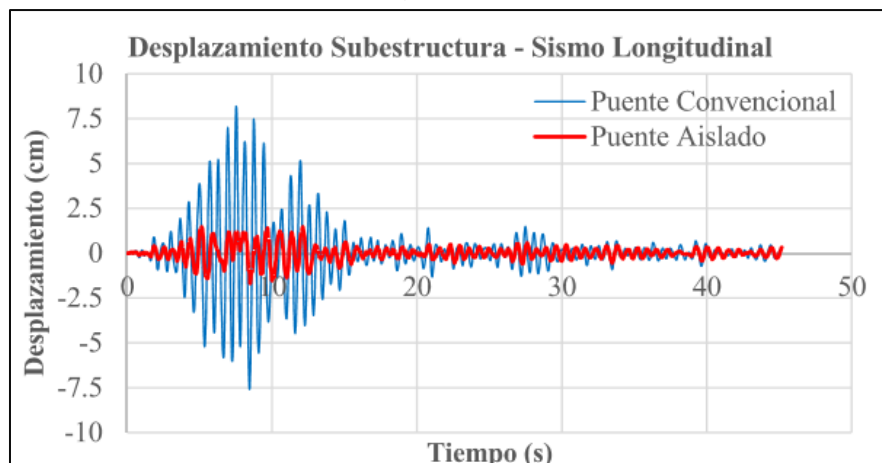
Fuente: Elaboración propia

Figura 45: Desplazamiento de la superestructura para el sismo transversal por el método de análisis no lineal TH.



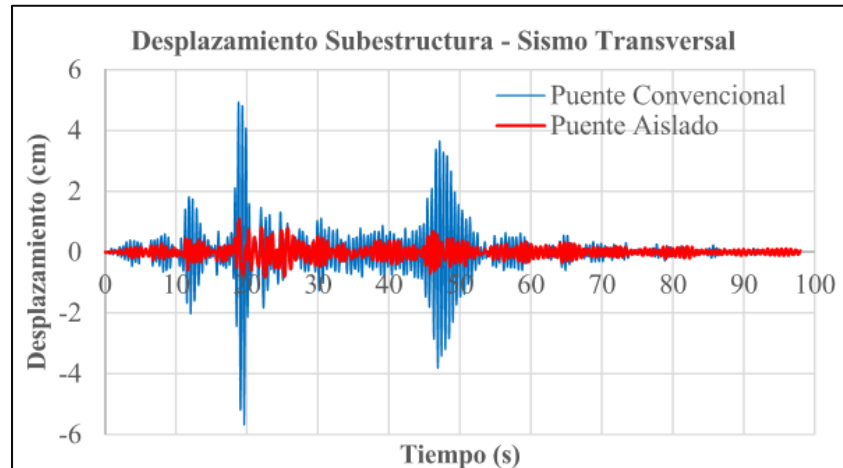
Fuente: Elaboración propia

Figura 46: Desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado para el sismo longitudinal TH-7039.



Fuente: Elaboración propia

Figura 47: Desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado para el sismo transversal TH-7050.

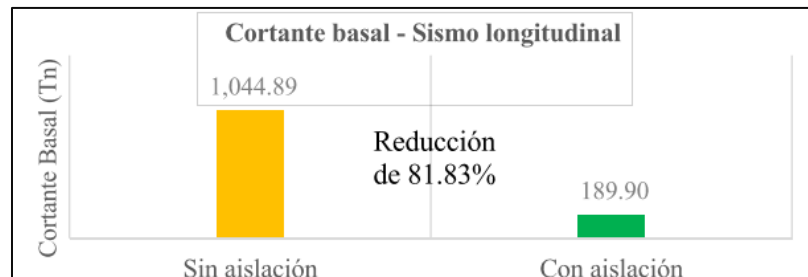


Fuente: Elaboración propia

4.5.3 COMPARACIÓN DE FUERZAS INTERNAS

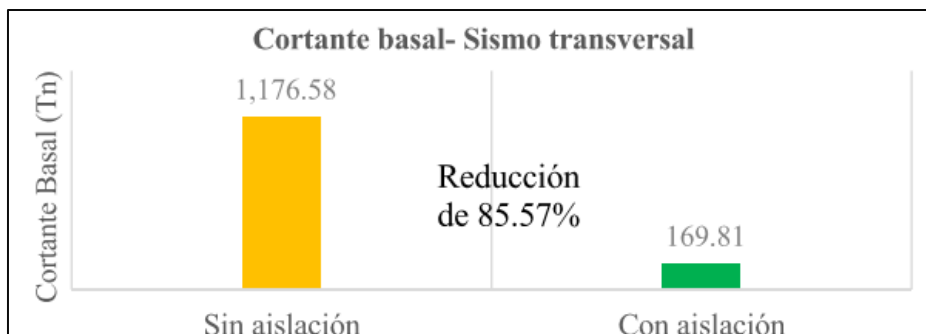
4.5.3.1 ANÁLISIS DE FUERZAS INTERNAS POR EL MÉTODO ESPECTRAL MULTIMODAL

Figura 48: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de analisis espectral multimodal.



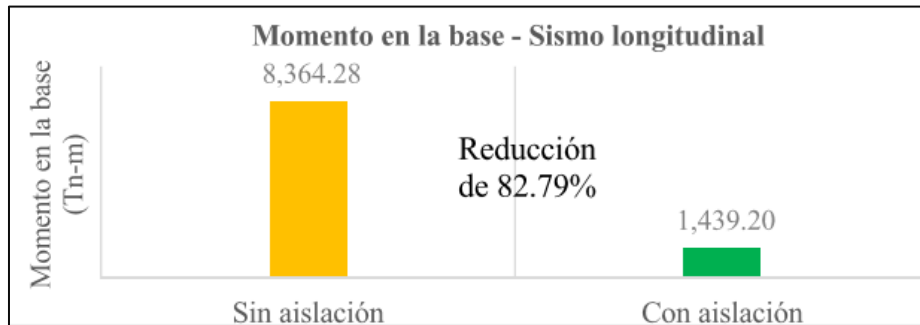
Fuente: Elaboración propia

Figura 49: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de analisis espectral multimodal.



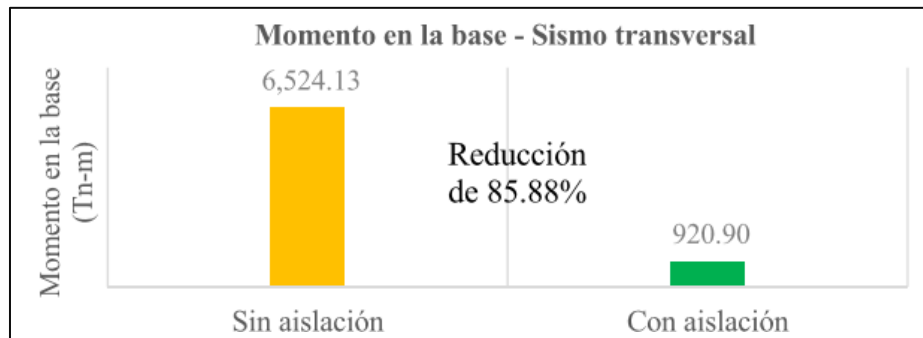
Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Momento en la base del pilar del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal por el método de análisis espectral multimodal.



Fuente: Elaboración propia

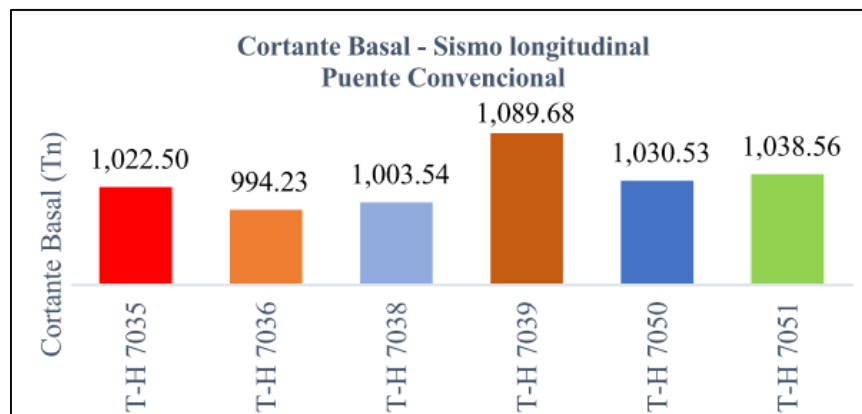
Figura 51: Momento en la base del pilar del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal por el método de análisis espectral multimodal.



Fuente: Elaboración propia

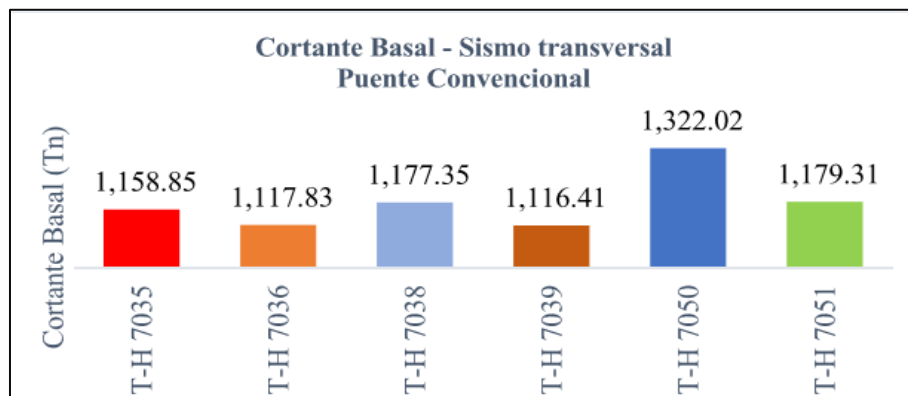
4.5.3.2 ANÁLISIS DE FUERZAS INTERNAS POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA

Figura 52: Cortante basal en el sentido longitudinal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



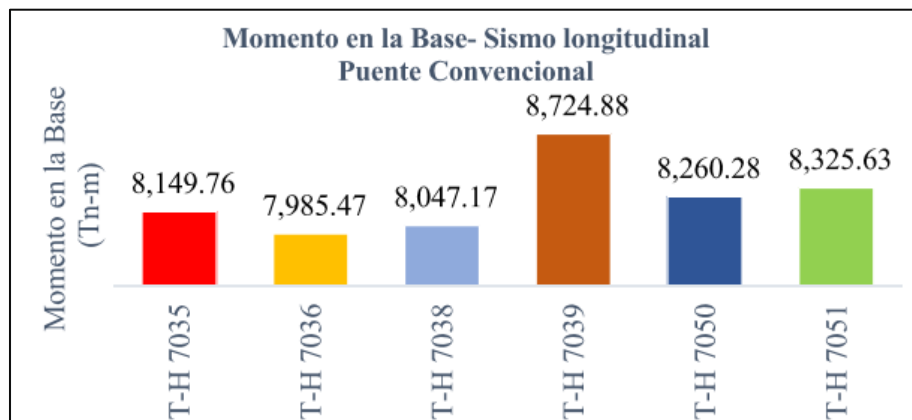
Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Cortante basal en el sentido transversal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



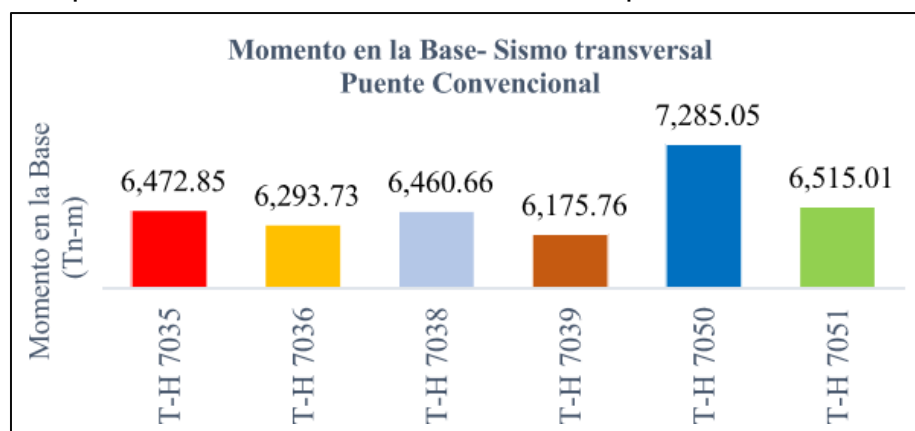
Fuente: Elaboración propia

Figura 54: Momento en la base en el sentido longitudinal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



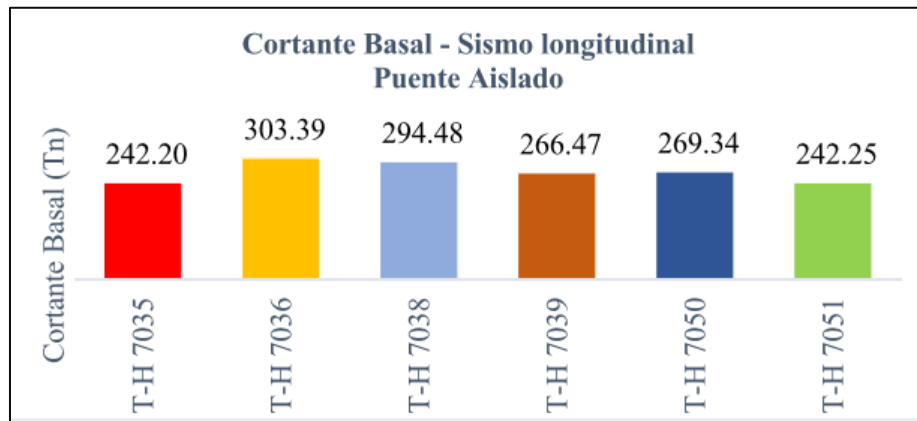
Fuente: Elaboración propia

Figura 55: Momento en la base en el sentido transversal del puente sin aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



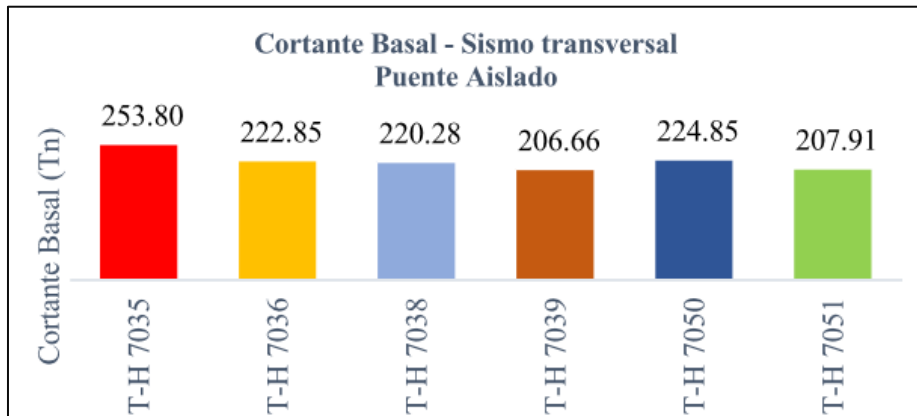
Fuente: Elaboración propia

Figura 56: Cortante basal en el sentido longitudinal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



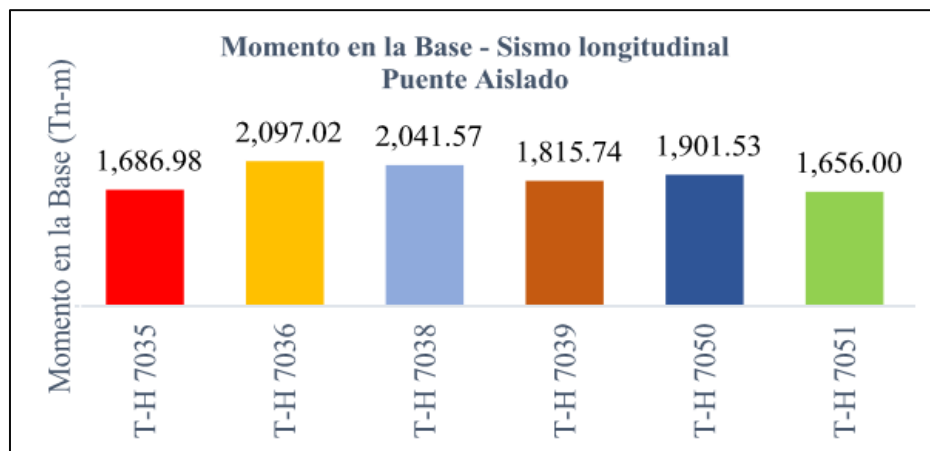
Fuente: Elaboración propia

Figura 57: Cortante basal en el sentido transversal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



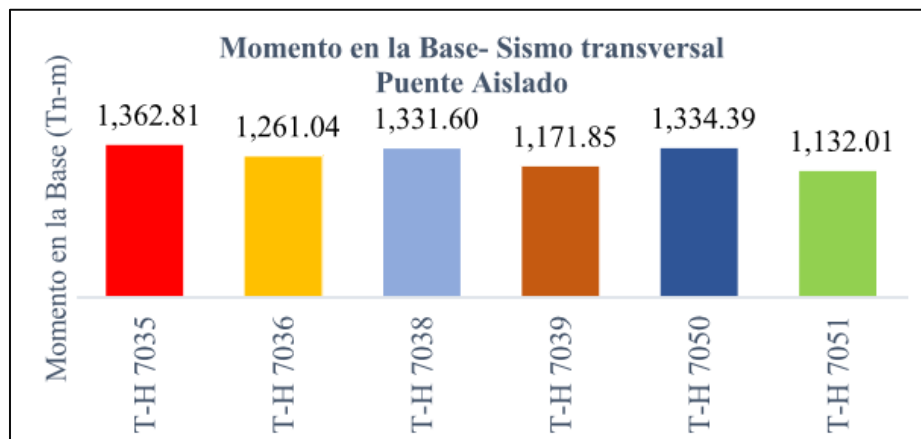
Fuente: Elaboración propia

Figura 58: Momento en la base del pilar en el sentido longitudinal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



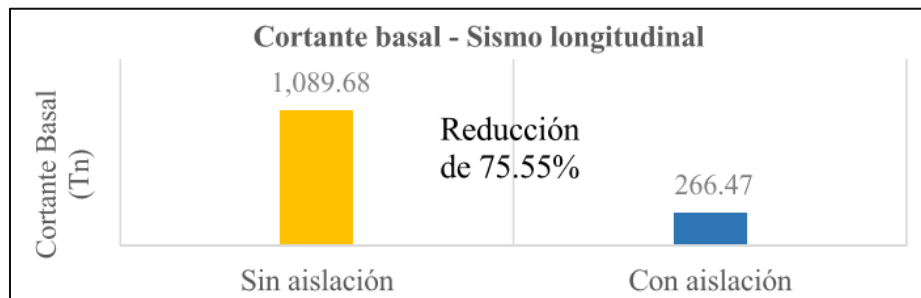
Fuente: Elaboración propia

Figura 59: Momento en la base del pilar en el sentido transversal del puente con aislación por el método de análisis no lineal tiempo historia



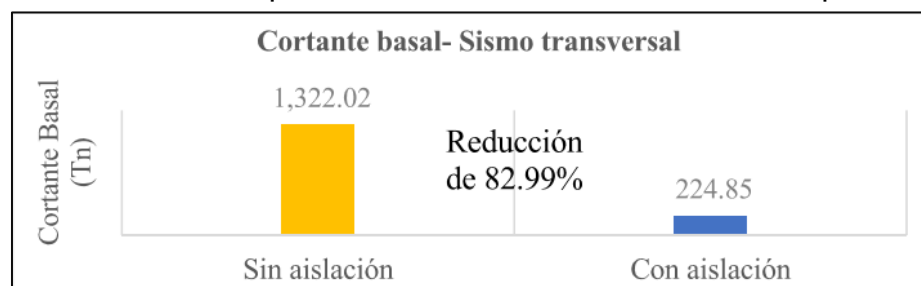
Fuente: Elaboración propia

Figura 60: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal TH-7039 por el método de análisis no lineal tiempo historia



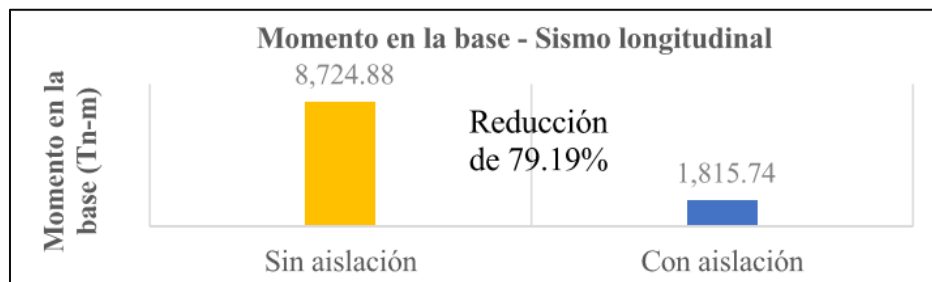
Fuente: Elaboración propia

Figura 61: Cortante basal del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal TH-7050 por el método de análisis no lineal tiempo historia



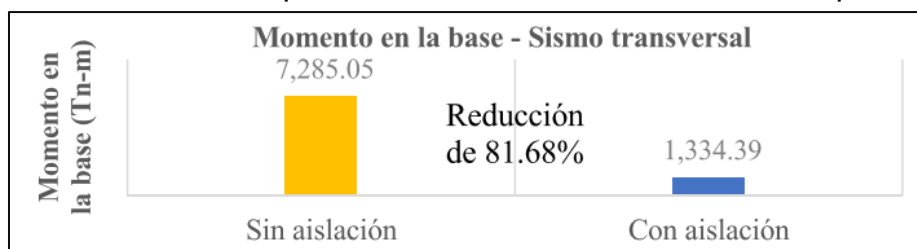
Fuente: Elaboración propia

Figura 62: Momento en la base del puente aislado y el puente convencional para el sismo longitudinal TH-7039 por el método de análisis no lineal tiempo historia



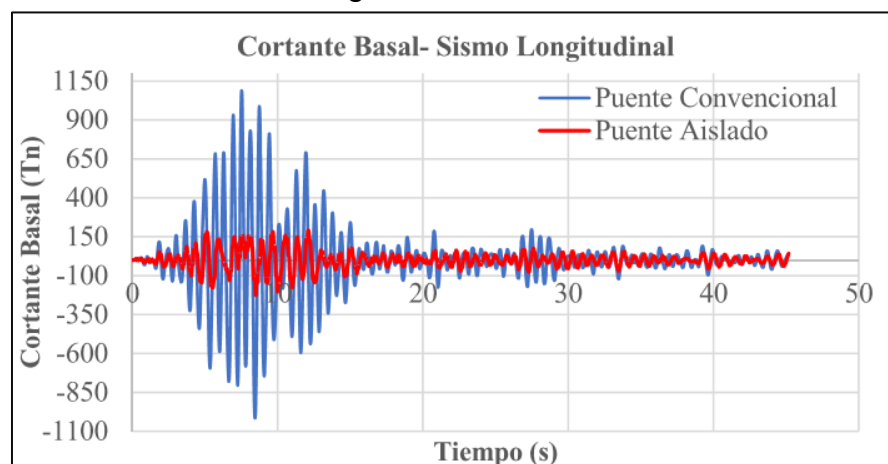
Fuente: Elaboración propia

Figura 63: Momento en la base del puente aislado y el puente convencional para el sismo transversal TH-7050 por el método de análisis no lineal tiempo historia



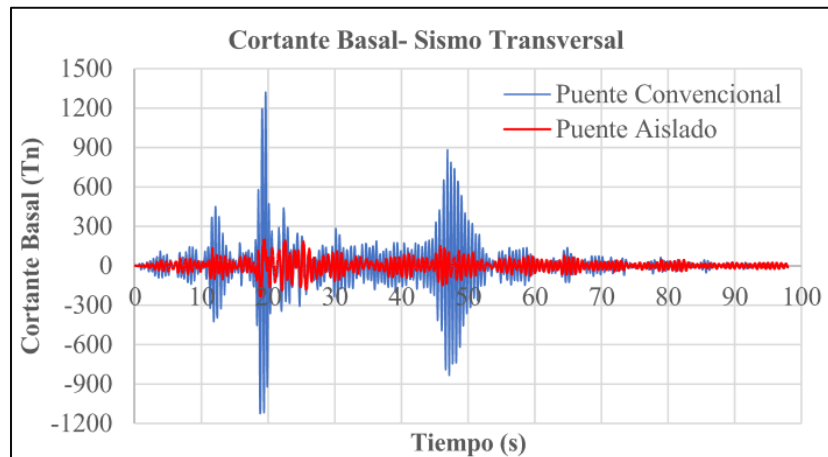
Fuente: Elaboración propia

Figura 64: Cortante basal del puente convencional y el puente aislado para el sismo longitudinal TH-7039.



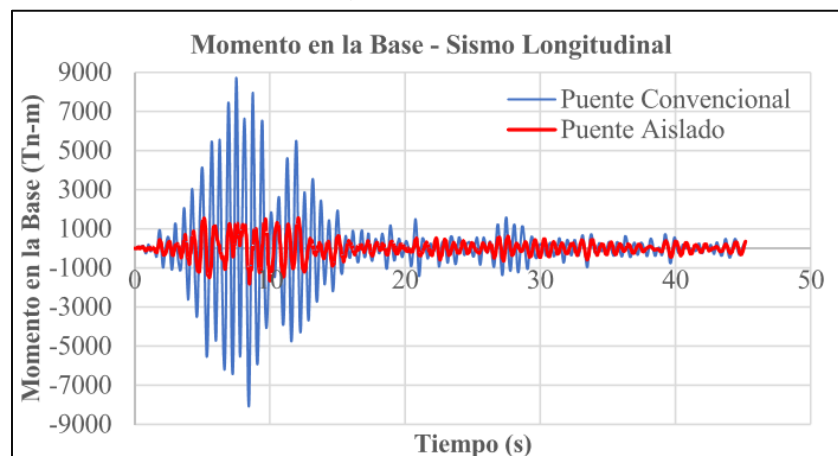
Fuente: Elaboración propia

Figura 65: Cortante basal del puente convencional y el puente aislado para el sismo transversal TH-7050.



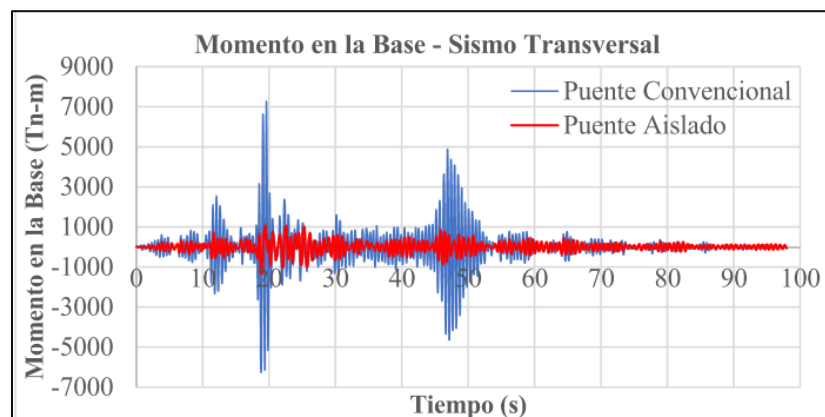
Fuente: Elaboración propia

Figura 66: Momento en la base del puente convencional y el puente aislado para el sismo longitudinal TH-7039



Fuente: Elaboración propia

Figura 67: Momento en la base del puente convencional y el puente aislado para el sismo transversal TH-7050



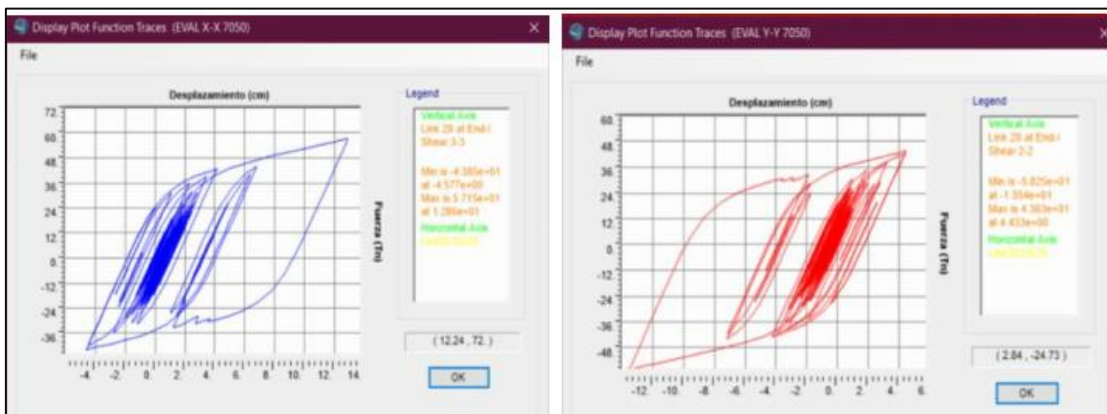
Fuente: Elaboración propia

Figura 68: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 4 ubicado en el extremo del pilar con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones



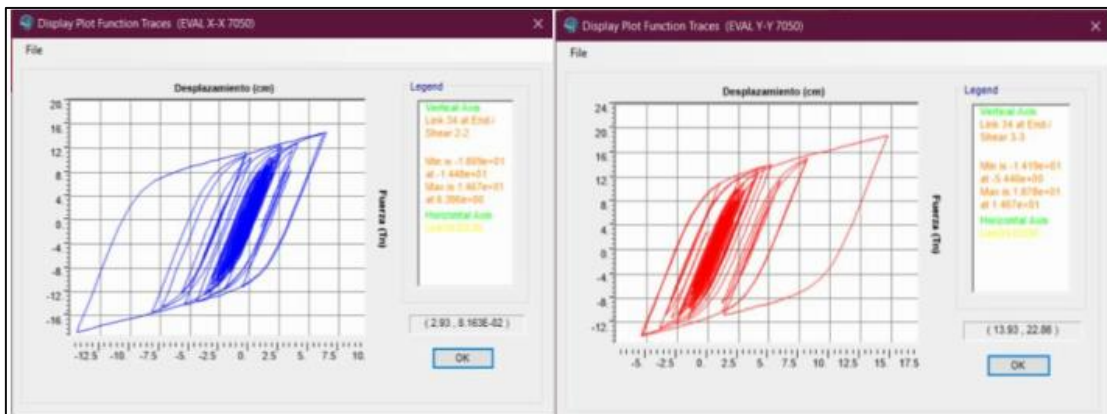
Fuente: Elaboración propia

Figura 69: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 3 ubicado en el extremo del pilar con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones



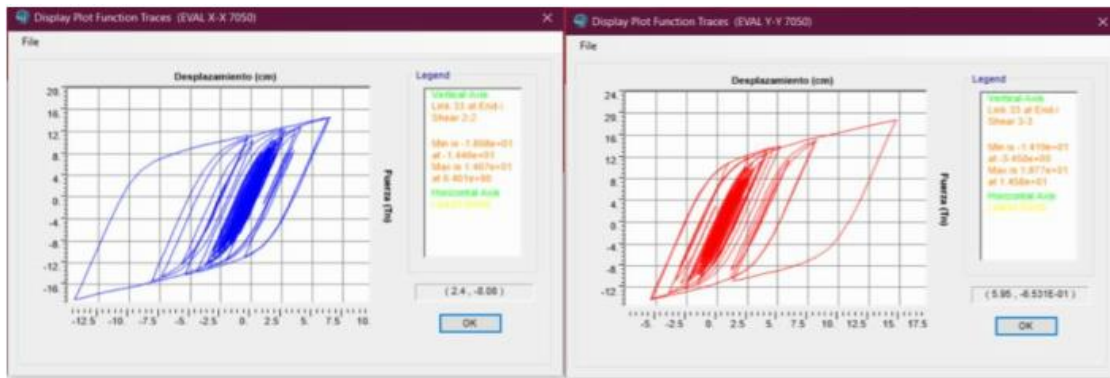
Fuente: Elaboración propia

Figura 70: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 2 ubicado en el extremo del estribo sur con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones



Fuente: Elaboración propia

Figura 71: Curvas de histéresis del aislador en el apoyo 1 ubicado en el extremo del estribo sur con el sismo TH-7050 analizadas en ambas direcciones



Fuente: Elaboración propia

V. DISCUSIÓN

5.1 RESUMEN DE LA COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL PUENTE

Tabla 27: Respuesta sísmica de desplazamientos de la superestructura del puente convencional y aislado

| PUENTE | ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO (cm) | | | |
|--------------|---------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | METODO ESPECTRAL MULTIMODAL | | METODO TIEMPO HISTORIA | |
| | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | |
| | SISMO LONG. | SISMO TRANS, | SISMO LONG. | SISMO TRANS, |
| CONVENCIONAL | 9.73 | 7.69 | 10.16 | 8.50 |
| AISLADO | 16.97 | 16.78 | 14.66 | 14.77 |
| COMPARACIÓN | 74.35% | 118.90% | 44.29% | 73.70% |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Respuesta sísmica de desplazamientos de la subestructura del puente convencional y aislado

| PUENTE | ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO (cm) | | | |
|--------------|---------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | METODO ESPECTRAL MULTIMODAL | | METODO TIEMPO HISTORIA | |
| | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | |
| | SISMO LONG. | SISMO TRANS, | SISMO LONG. | SISMO TRANS, |
| CONVENCIONAL | 7.86 | 5.11 | 8.20 | 5.68 |
| AISLADO | 1.33 | 0.72 | 1.69 | 1.1 |
| COMPARACIÓN | 83.09% | 85.83% | 79.39% | 80.72% |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Respuesta sísmica de la cortante basal de la subestructura del puente convencional y aislado

| PUENTE | CORTANTE BASAL (Tn) | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | METODO ESPECTRAL MULTIMODAL | | METODO TIEMPO HISTORIA | |
| | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | |
| | SISMO LONG. | SISMO TRANS, | SISMO LONG. | SISMO TRANS, |
| CONVENCIONAL | 1,044.89 | 1176.58 | 1089.68 | 1322.02 |

| | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| AISLADO | 189.9 | 169.81 | 266.47 | 224.85 |
| COMPARACIÓN | 81.83% | 85.57% | 75.55% | 82.99% |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Respuesta sísmica del momento en la base de la subestructura del puente convencional y aislado

| PUENTE | MOMENTO EN LA BASAL (Tn) | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | METODO ESPECTRAL MULTIMODAL | | METODO TIEMPO HISTORIA | |
| | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | | SUBESTRUCTURA DEL PUENTE | |
| | SISMO LONG. | SISMO TRANS, | SISMO LONG. | SISMO TRANS, |
| CONVENCIONAL | 8,364.28 | 6,524.13 | 8,724.88 | 7,285.05 |
| AISLADO | 1,439.20 | 920.9 | 1,815.74 | 1,334.39 |
| COMPARACIÓN | 82.79% | 85.88% | 79.19% | 81.68% |

Fuente: Elaboración propia

También tenemos datos difíciles de aceptar sobre los desplazamientos de la superestructura y la subestructura.

- ZLATAR (2019), indica que la adición de los aisladores aumenta la rigidez en la intersección de la superestructura y la subestructura, incrementando la rigidez global del puente y la demanda impuesta a los pilares, aunque de forma pequeña, con una disminución máxima de la demanda en los pilares de aproximadamente el 3% y un aumento máximo de la demanda en los pilares de aproximadamente el 20%.
- BLAS (2019), indica que un seísmo moderado ($T_r=475$ años) tiene desplazamientos de 1,7 cm en el eje X y de 0,28 cm en el eje Y, que se reducen en un 80% en comparación con un seísmo grave ($T_r=1000$ años), que tiene desplazamientos de 7,23 cm en el eje X y de 1,32 cm en el eje Y.

5.2 COMPARACIÓN DEL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LA SUBESTRUCTURA

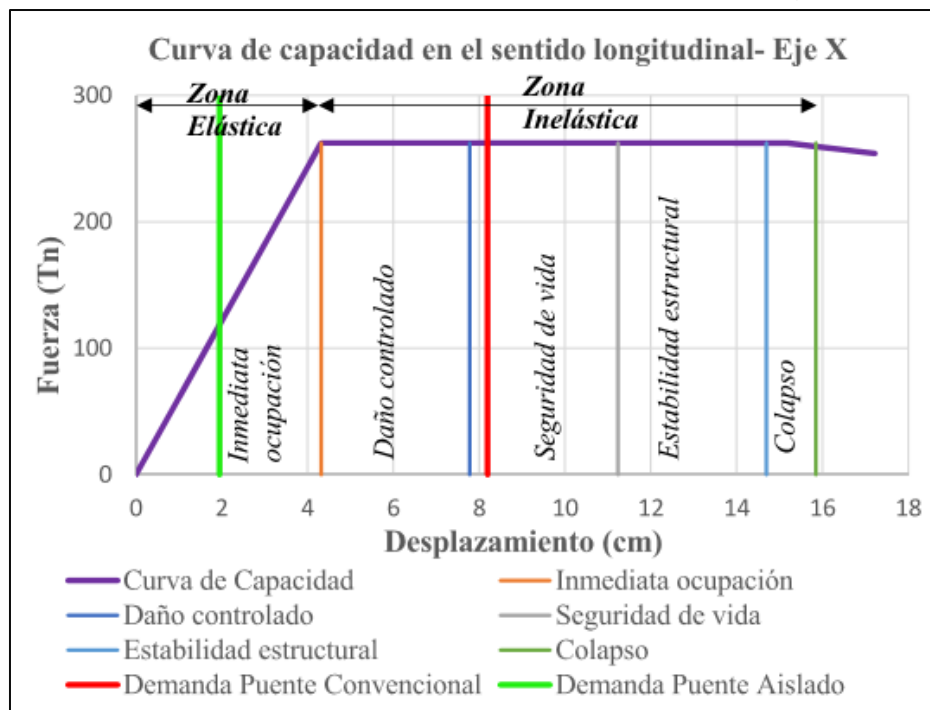
Tabla 31: Sectorización de los niveles de desempeño del puente según (ATC-40, 1996)

| NIVELES DE DAÑO SEGÚN ATC-40 | EXPRESIÓN | EJE "X" (cm) | EJE "Y" (cm) |
|------------------------------|--|--------------|--------------|
| Inmediata ocupación | Δy | 4.32 | 4.32 |
| Daño controlado | $\Delta y + 0.3 (\Delta u - \Delta y)$ | 7.78 | 7.78 |
| Seguridad de vida | $\Delta y + 0.6 (\Delta u - \Delta y)$ | 11.24 | 11.24 |
| Estabilidad estructural | $\Delta y + 0.9 (\Delta u - \Delta y)$ | 14.70 | 14.70 |
| Colapso | Δu | 15.85 | 15.85 |

Fuente: Elaboración propia

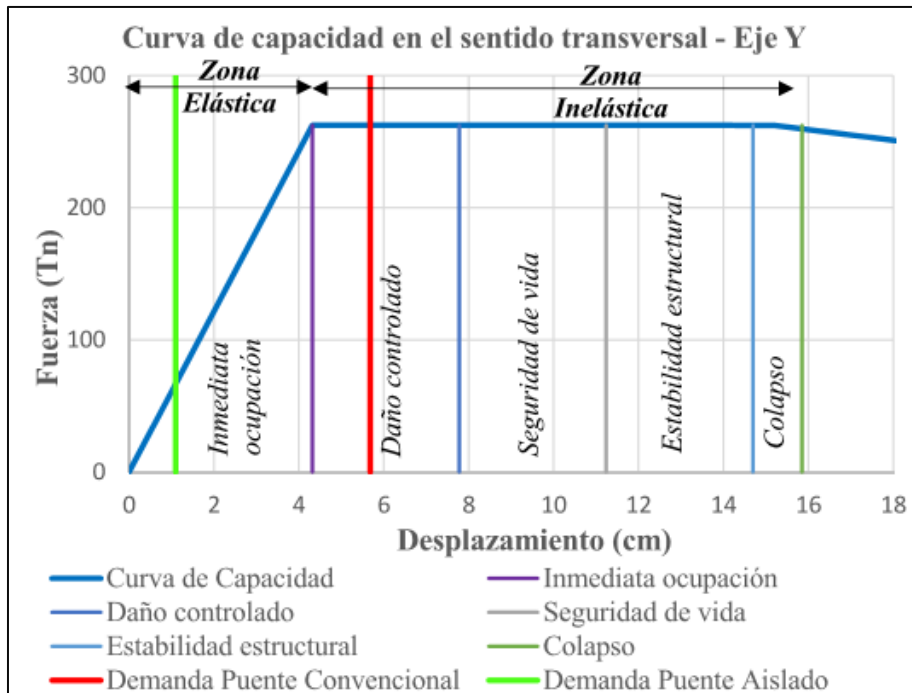
"Seguridad vital" es el grado de prestaciones que alcanza el puente convencional y aislado tanto en sentido longitudinal (eje X) como transversal (eje Y).

Figura 72: Nivel de desempeño del puente en el sentido longitudinal



Fuente: Elaboración propia

Figura 73: Nivel de desempeño del puente en el sentido transversal



Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Demanda vs capacidad en el sentido longitudinal y transversal de la estructura de puente convencional

| DESCRIPCIÓN | DEMANDA (cm) | CAPACIDAD (cm) | RATIO |
|--------------------|--------------|----------------|-------|
| Sismo Longitudinal | 8.20 | 15.85 | 0.52 |
| Sismo Transversal | 5.68 | 15.85 | 0.36 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Demanda vs capacidad en el sentido longitudinal y transversal de la estructura de puente aislado

| DESCRIPCIÓN | DEMANDA (cm) | CAPACIDAD (cm) | RATIO |
|--------------------|--------------|----------------|-------|
| Sismo Longitudinal | 1.95 | 15.85 | 0.12 |
| Sismo Transversal | 1.10 | 15.85 | 0.07 |

Fuente: Elaboración propia

Otros resultados confrontables, tenemos acerca del desempeño de la subestructura

- ZLATAR (2019), La curva del análisis pushover demuestra claramente el aumento de rigidez de la estructura una vez cerrada la brecha en los topos, lo que indica que el desplazamiento está bajo

control. Los resultados de los estudios a lo largo del tiempo también reflejan este control del desplazamiento.

- BLAS (2019), La rotación máxima es de 0,0307 rad en el eje X y 0,0045 rad en el eje Y para terremotos moderados y de 0,0452 rad en el eje X y 0,0074 rad en el eje Y para terremotos severos, según el estudio pushover estático no lineal.

VI. CONCLUSIONES

1. El comportamiento de la estructura aislada durante el terremoto de diseño se encuentra en el rango elástico lineal (ocupación inmediata), pero el puente convencional se comporta como "seguridad vital" en la dirección longitudinal y como "daño controlado" en la dirección transversal, lo que indica que la estructura se encuentra en el rango elástico no lineal sin dejar de cumplir los objetivos de rendimiento exigidos por los códigos de diseño.
2. El desplazamiento aumenta un 118,90% en la dirección transversal y un 74,35% en la dirección longitudinal para la superestructura del puente aislado simulado. El enfoque del Análisis Espectral Multimodal reduce el desplazamiento en la subestructura del puente aislado en un 83,09% para el terremoto longitudinal y en un 85,83% para el terremoto transversal. Los esfuerzos cortantes basales se reducen en un 81,83% para los seísmos longitudinales y en un 85,57% para los seísmos transversales cuando el puente se separa simbólicamente. Para los terremotos longitudinales y transversales, respectivamente, el momento flector en la base del puente es un 82,79% y un 85,88% menor con aislamiento térmico. Utilizando el enfoque de análisis no lineal de la historia temporal, el desplazamiento se reduce en un 79,39% para el terremoto longitudinal y en un 80,72% para el terremoto transversal. El desplazamiento de la superestructura del puente aumenta con el aislamiento térmico en un 73,70% en caso de terremoto transversal y en un 44,29% en caso de terremoto longitudinal. El esfuerzo cortante basal del puente se reduce con el aislamiento térmico en un 82,99% para un seísmo transversal y en un 75,55% para un seísmo longitudinal. El momento flector al pie del muelle se reduce en un 79,19% para un seísmo longitudinal y en un 81,68% para un seísmo transversal cuando se aísla térmicamente un puente.
3. En resumen, el puente aislado con este sistema de protección reduce claramente los desplazamientos y las fuerzas internas en la subestructura en comparación con el diseño convencional, pero los desplazamientos

aumentan en la superestructura como resultado de la disipación de energía causada por la deformación de los aisladores, lo que indica que el modelo aislado es capaz de proporcionar condiciones más estables y seguras que el modo convencional.

VII. RECOMENDACIONES

1. En la zona de Puno, se aconseja hacer un estudio estructural de un puente con varios tipos de aisladores elastoméricos, base fija e interacción suelo-estructura.
2. Se aconseja hacer un estudio comparativo del péndulo friccional, diseño convencional y varios tipos de aisladores elastoméricos para determinar cómo respondería sísmicamente el puente ante un sismo.
3. Se aconseja utilizar aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y el diseño estándar para analizar el comportamiento sísmico del puente utilizando la técnica aerodinámica, el enfoque de historia temporal no lineal y la interacción suelo-estructura.
4. Se aconseja el uso de estos aisladores (LRB) en futuros diseños de estructuras de puentes, teniendo en cuenta que durante un evento sísmico, las cargas de fuerza serán significativas y que combinando la eficacia de los aisladores con la rigidez de la subestructura, la estructura funcionará eficazmente. Como resultado, los puentes equipados con este sistema seguirán funcionando después del terremoto.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2014). AASHTO Bridge Design Specifications (LRFD). In *Chemistry &* (Vol. 6).
- AASHTO. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (American & A. of S. H. and T. Officials. (eds.); 8th ed., Vol. 8, Issue 15).
<https://store.transportation.org/Common/DownloadContentFiles?id=1648>
- ASSTHO. (2010). *Guide Specifications for Seismic Isolation Desing* (GSID-3 (ed.); Third (201, p. 47).
- Avossa, A. M., Di Giacinto, D., Malangone, P., & Rizzo, F. (2018). Seismic retrofit of a multispan prestressed concrete girder bridge with friction pendulum devices. *Shock and Vibration*, 2018, 1–22.
<https://doi.org/10.1155/2018/5679480>
- Benjumea, J., “Saiid” Saiidi, M., & Itani, A. (2020). Seismic performance analysis and assessment of a precast bridge computational model. *DYNA (Colombia)*, 87(212), 80–89. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.80143>
- Billah, A. M., & Todorov, B. (2019). Effects of subfreezing temperature on the seismic response of lead rubber bearing isolated bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126(August), 105814.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105814>
- Buckle, I., Constantinou, M., Dicleli, M., & Ghasemi, H. (2006). *Seismic Isolation of Highway Bridges* (Issue 1). MCEER.
- Cobo, D., Raventós, I., & Leal, R. (2018). *Puentes de Ferrocarril con Aislamiento Sísmico. XXXVIII JSIE LIMA. November.*
- Constantinescu, S. A., & Răcănel, I. R. (2017). Seismic Isolation of Bridges Using the Principle of Electromagnetic Attraction and Repulsion. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 6(1), 1–14. <https://doi.org/10.1515/rjti-2017-0050>
- Constantinou, M. C., I., K., Filiatrault, A., & Ecker Lay, R. A. (2011). LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators: MCEER-11-0004. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER)*, 65, 270.
<http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/LRFD-Based-Analysis-and-Design-Procedures-for-Bridge-Bearings-and-Seismic-Isolators-MCEER-11-0004.html>
- Deng, P., Gan, Z., Hayashikawa, T., & Matsumoto, T. (2020). Seismic response of highway viaducts equipped with lead-rubber bearings under low temperature. *Engineering Structures*, 209(December 2018), 110008.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110008>
- Edalati, A. A., & Tahghighi, H. (2020). Investigating the performance of isolation systems in improving the seismic behavior of urban bridges. A case study on the Hesarak bridge. *Archives of Civil Engineering*, 65(4), 155–175.
<https://doi.org/10.2478/ace-2019-0052>
- Ismail, M., Rodellar, J., & Casas, J. R. (2016). Seismic behavior of RNC-isolated bridges: A comparative study under near-fault, long-period, and pulse-like ground motions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
<https://doi.org/10.1155/2016/1897045>
- Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Khan, N. B., & Ghadim, H. B. (2018). Seismic isolation retrofitting solution for an existing steel cable-stayed bridge. *PLoS ONE*, 13(7), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200482>

- Lama, L. F., & Vásquez, L. A. (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. *Repositorio Institucional - URP*. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2644>
- Lee Marsh, M., Buckle, I. G., & Kavazanjian, E. (2014). *LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges - Reference Manual*. FHWA-NHI-15-004, 608.
- Li, B., Wang, B., Wang, S., & Wu, X. (2020). Energy response analysis of continuous beam bridges with friction pendulum bearing by multihazard source excitations. *Shock and Vibration*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3724835>
- Liu, Q., & Yang, C. (2020). Seismic damage probability assessment of isolated girder bridges based on performance under near-field earthquakes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/app11209595>
- Load, S., Xiang, Y., Ding, Y., Shi, X., Zhang, B., Yu, L., Chen, Z., & Long, X. (2020). *Coupling methods and optimal use of modern anti-seismic insulation systems at building and bridge construction structures*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1182/1/012070>
- Minavand, M., & Ghafory-Ashtiany, M. (2019). Seismic evaluation of horizontally curved bridges subjected to near-field ground motions. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(2), 1–15. <https://doi.org/10.1590/1679-78255438>
- Minchán, M. L. (2016). *Comparación de la Respuesta Sísmica de Puentes Viga – Losa, con y sin Aisladores Sísmicos, en Cajamarca* (UNIVERSIDA). Ministerio de transportes y comunicaciones. (2018). *Manual del Puentes*. 630, 630.
- Mohammed, M., Sanders, D. H., & Buckle, I. G. (2017). Reinforced concrete bridge columns tested under long and short-duration ground motions. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nassar, M., Guizani, L., Nollet, M. J., & Tahan, A. (2019). A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated bridges in cold regions. *Engineering Structures*, 197(March), 109353. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109353>
- Osgooei, P. M., Tait, M. J., & Konstantinidis, D. (2017). Non-iterative computational model for fiber-reinforced elastomeric isolators. *Engineering Structures*, 137, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.056>
- Ouanani, M., Sandjak, K., & Tiliouine, B. (2020). Dynamic analysis of a multi-span simply supported prestressed concrete bridge with restrainers and seismic isolation devices. *Journal of Building Materials and Structures*, 7(1), 105–118. <https://doi.org/10.34118/jbms.v7i1.709>
- Rodríguez, A. (2020). *Puentes con AASHTO LRFD 2017* (8 th Editi, Issue 1).
- Siqueira, G. H., Sanda, A. S., Paultre, P., & Padgett, J. E. (2014). Fragility curves for isolated bridges in eastern Canada using experimental results. *Engineering Structures*, 74, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.053>
- Siqueira, G. H., Tavares, D. H., Paultre, P., & Padgett, J. E. (2014). Performance evaluation of natural rubber seismic isolators as a retrofit measure for typical multi-span concrete bridges in eastern Canada. *Engineering Structures*, 74,

- 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.009>
- Tubaldi, E., Dall'Asta, A., & Dezi, L. (2015). Seismic response analysis of continuous multispan bridges with partial isolation. *Shock and Vibration*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/183756>
- Yan, L., Li, Q., Han, C., & Jiang, H. (2016). Shaking Table Tests of Curved Bridge considering Bearing Friction Sliding Isolation. *Shock and Vibration*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6245062>
- Zhang, H., Li, J., & Peng, T. (2013). Development and mechanical performance of a new kind of bridge seismic isolator for low seismic regions. *Shock and Vibration*, 20(4), 725–735. <https://doi.org/10.3233/SAV-130780>

ANEXOS

DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

De acuerdo al estudio de topografía y diseño geométrico de vía, el trazo ha sido efectuado aprovechando la sección de la vía Panamericana Sur existente y cumpliendo los parámetros establecidos en el Manual de Diseño Geométrico de Vías Urbanas – 2005 - VCHI y el Manual de Diseño Geométrico de carreteras DG - 2018., de las cuales la vía tiene las siguientes características técnicas:

Clasificación : Carretera de Segunda Clase

Velocidad Directriz : 60 km/h.

Longitud total : 00+540 Km.

Ancho de carril : 3.60 m.

Bermas laterales : 1.20 y 1.50 m.

Pendiente Máxima : 8.00 %.

Pendiente Mínima : 0.00 %

Bombeo : 2.50 %

PARÁMETROS GENERALES DEL PUENTE

Tipo de Puente : Vehicular

Recto o Curvo : Recto

Longitud Total : 80.00 m.

Número de tramos : 3

Número de carriles : 2

Radio de Curvatura : - m.

Ancho de tablero : 10.60 m.

Ancho de carril : 3.60 m.

Gálibo : 5.50m

PREDIMENSIONAMIENTO LONGITUDINAL

La ubicación del puente permite determinar las medidas de la luz o luces del puente de uno o varios tramos, a la vez este parámetro permitirá establecer el tipo de sección y tipo de material.

Longitud central (L2) : 30 m.
Material : Concreto postensado
Tipo : Vigas cajón
Tramos : Continuos

Longitud del tramo exterior:

$$L1 = 0.823 * L2 = 24.65 \approx 25.00 \text{ m.}$$

Longitud del apoyo (supuesto) : 0.75 m

Luz de diseño de la viga interior :

$$s1 = L2 = 30 \text{ m.}$$

Luz de diseño de la viga exterior :

$$S2 = L1 - \frac{N}{2} = 25 - \frac{0.75}{2} = 24.625$$

PREDIMENSIONAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

La profundidad mínima para superestructuras según la AASHTO LRFD se determina para tramos simples y tramos continuos.

ALTURA MÍNIMA

Material : Concreto postensado
Tipo : Vigas cajón
Altura mínima, tramo simple H_{\min} : $0.045 * S1 = 1.35 \text{ m.}$
Altura mínima, tramo continuo H_{\min} : $0.040 * S1 = 1.20 \text{ m.}$

ANCHOS EFECTIVOS

Ancho de tablero, B : 10.60 m.
Separación entre nervios, $S_v = B/3$: 3.53
Longitud del voladizo, $L_v = S_v/2$: 1.77
Longitud del voladizo adoptada, L_v : 1.70
Separación entre nervios, S_v : 2.40

ESPESOR DE NERVIOS

Se tomara el 70% del espesor de vigas T

Espesor, b_w : 0.25 m.

ESPESOR DEL TABLERO SUPERIOR

| | |
|--|------------|
| Luz de diseño para placa entre vigas, $S_p = S_v - 2(b_w/2)$ | : 2.15 m. |
| Espesor mínimo requerido, $t_p' = (S_p + 3.05)/30 > 0.165$ | : 0.173 m. |
| Espesor adoptado, t_p | : 0.20 m. |

ESPESOR DEL LOSA INFERIOR

| | |
|--|------------|
| Espesor mínimo 1: $t_{p1} = S_p/16 < t_p$ | : 0.134 m. |
| Espesor mínimo 2: $t_{p2} = 14\text{cm} < t_p$ | : 0.14 m. |
| Espesor adoptado, t_{pi} | : 0.25 m. |

ACARTELAMIENTO

El acartelamiento entre nervios y la losa

| | |
|---|-----------|
| Ancho acartelamiento superior, t_{acs} | : 0.1 m. |
| Ancho acartelamiento inferior, t_{aci} | : 0.1 m. |
| Espesor en el acartelamiento en la placa del voladizo, t_{pv} | : 0.15 m. |

BARANDA

| | |
|--|-----------|
| Ancho de bordillo en la parte inferior, b_{bs} | : 0.35 m. |
| Ancho de bordillo en la parte superior, b_{bi} | : 0.30 m. |
| Altura del bordillo, h_b | : 0.30 m. |
| Ancho de baranda, b_{bar} | : 0.20 m. |

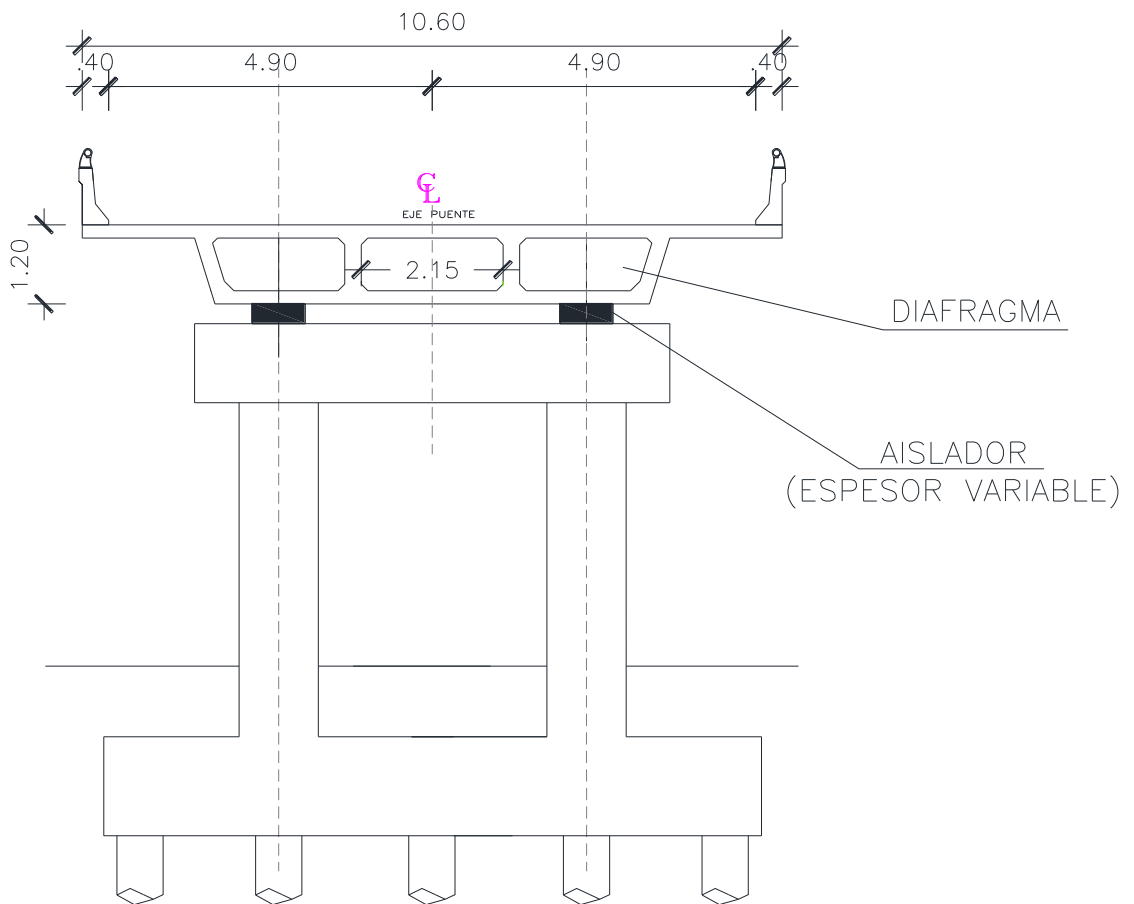
PAVIMENTO

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Espesor de carpeta asfáltica, t_r | : 0.05 m. |
|-------------------------------------|-----------|

RIOSTRAS

| | |
|---|-----------|
| Espesor de riostra de apoyo extremo, t_{ra} | : 0.45 m. |
| Espesor de riostra intermedia, t_{ri} | : 0.25 m. |
| Cantidad de riostra intermedia, N_r | : 3 |
| Separación entre riostras intermedias, S_r | : 10.0 m. |

Figura 74: Sección principal pre dimensionado



Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN VIGA CAJÓN

$$f'_{ci} = 280 \frac{kgf}{cm^2} = 4.0 \text{ ksi} \quad E_{ci} = 250,998.00 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$f'_c = 350 \frac{kgf}{cm^2} = 5.0 \text{ ksi} \quad E_c = 280,624.30 \frac{kgf}{cm^2}$$

PROPIEDADES DE ACERO

Postensado acero G270

$$f_y = 16600 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$E_c = 2,000,000.00 \frac{kg}{cm^2} = 200,000 \text{ MPa}$$

$$\mu_c = 0.15$$

ASTM A615 Grado 60

$$f_y = 4200 \frac{kgf}{cm^2} = 420 MPa$$

$$E_c = 2,000,000.00 \frac{kg}{cm^2} = 200,000 MPa$$

$$\mu_c = 0.30$$

DENSIDADES DE LOS MATERIALES

Según AASHTO LRFD se tiene:

Concreto armado : 2.50 Tn/m³

Acero de refuerzo : 7.85 Tn/m³

Asfalto : 2.25 Tn/m³

Baranda metálica : 0.08 Tn/m³

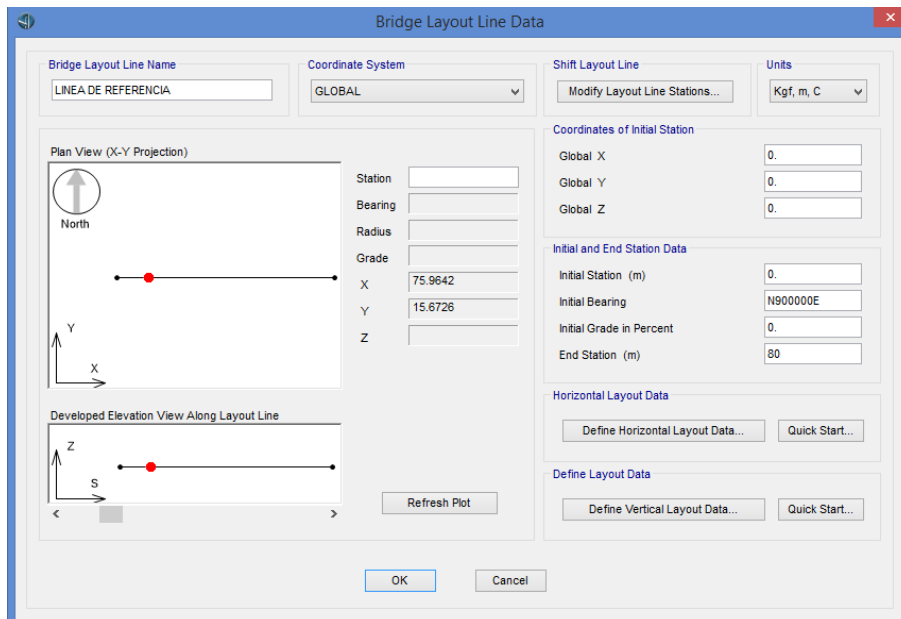
DESARROLLO DE LA GEOMETRÍA DEL PUENTE

El diseño del puente, fue asistido mediante el software SCI Bridge v21. Este programa nos facilitará modelar el puente en 3D y posterior análisis.

DEFINICIÓN DE TRAZO DEL EJE VIAL

Definimos la orientación del eje del puente, nombre, longitud, alineación vertical y horizontal, desde las coordenadas de una estación inicial hasta el final

Figura 75: Trazo del eje vial del puente



Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE ANCHO DE CARRIL

Definimos el nombre, estación, longitud desde la línea central hasta el centro del carril, ello para cada carril de diseño.

Figura 76: Ancho de carril 1 y 2

General

Lane Name: CARRIL 1

Coordinate System: GLOBAL

Units: Kg, m, C

Maximum Lane Load Discretization Lengths

Along Lane: 3

Across Lane: 3

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane

Discretization Length Not Greater Than 1/ 4 of Span Length

Discretization Length Not Greater Than 1/ 10 of Lane Length

Lane Data

| Bridge Layout Line | Station m | Centerline Offset m | Lane Width m | Radius m |
|---------------------|-----------|---------------------|--------------|----------|
| LINEA DE REFERENCIA | 0 | -1.8 | 3.6 | 0 |
| LINEA DE REFERENCIA | 80 | -1.8 | 3.6 | 0 |

Lane type

Fixed Lane Floating Lane Set

1 Fixed Lane

Plan View (X-Y Projection)

Layout Line: []

Station: []

Bearing: []

Radius: []

Grade: []

X: 75.1918

Y: -36.0563

Z: []

Snap To Layout Line Snap To Lane

Lane Edge Type

Left Edge: Exterior

Right Edge: Interior

Objects Loaded By Lane

Program Determined Group

General

Lane Name: CARRIL 2

Coordinate System: GLOBAL

Units: Kg, m, C

Maximum Lane Load Discretization Lengths

Along Lane: 3

Across Lane: 3

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane

Discretization Length Not Greater Than 1/ 4 of Span Length

Discretization Length Not Greater Than 1/ 10 of Lane Length

Lane Data

| Bridge Layout Line | Station m | Centerline Offset m | Lane Width m | Radius m |
|---------------------|-----------|---------------------|--------------|----------|
| LINEA DE REFERENCIA | 0 | 1.8 | 3.6 | 0 |
| LINEA DE REFERENCIA | 80 | 1.8 | 3.6 | 0 |

Lane type

Fixed Lane Floating Lane Set

1 Fixed Lane

Plan View (X-Y Projection)

Layout Line: []

Station: []

Bearing: []

Radius: []

Grade: []

X: []

Y: []

Z: []

Snap To Layout Line Snap To Lane

Lane Edge Type

Left Edge: Interior

Right Edge: Exterior

Objects Loaded By Lane

Program Determined Group

Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Definimos las características de los materiales de las losas, nervios, diafragmas, viga cabezal, Pilas, Estribos, cimientos, las cuales son:

Figura 77: Definición de material Concreto $f'c = 280$ y 350 kg/cm^2

The figure shows two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in a software application. Both windows are for concrete materials and share the same layout:

- General Data:** Material Name and Display Color (f'c=280kg/cm2 on left, f'c=350kg/cm2 on right), Material Type (Concrete), Material Grade (f'c=280kg/cm2 on left, f'c=350kg/cm2 on right), and Material Notes.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (2.400E-03) and Mass per Unit Volume (2.447E-06) with units set to Kgf, cm, C.
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (250998 on left, 280624.30 on right), Poisson, U (0.2), Coefficient Of Thermal Expansion, A (9.900E-06), and Shear Modulus, G (104582.5 on left, 116926.79 on right).
- Other Properties For Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, Fc (280 on left, 350 on right), Expected Concrete Compressive Strength (280 on left, 350 on right), and a checkbox for Lightweight Concrete.

Fuente: Elaboración propia

Figura 78: Definición del material acero ASTM A615 y G270

The figure shows two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in a software application. Both windows are for steel materials and share the same layout:

- General Data:** Material Name and Display Color (Fy=4200kg/cm2 on left, acero G270 on right), Material Type (Rebar on left, Tendon on right), Material Grade (Grade 60 on left, Grade 150 - Deformed (Type II) on right), and Material Notes.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (7.849E-03 on left, 7.850E-03 on right) and Mass per Unit Volume (8.004E-06 on left, 8.005E-06 on right) with units set to Kgf, cm, C.
- Uniaxial Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (2038901.9 on left, 2000000 on right), Poisson, U (0.3 on left, 0 on right), Coefficient Of Thermal Expansion, A (1.170E-05), and Shear Modulus, G (empty on left, 1054604.4 on right).
- Other Properties For Rebar/Tendon Materials:** Minimum Yield Stress, Fy (4200 on left, 8436.835 on right), Minimum Tensile Stress, Fu (6327.6266 on left, 10546.044 on right), Expected Yield Stress, Fye (4640.2595), and Expected Tensile Stress, Fue (6960.3893).

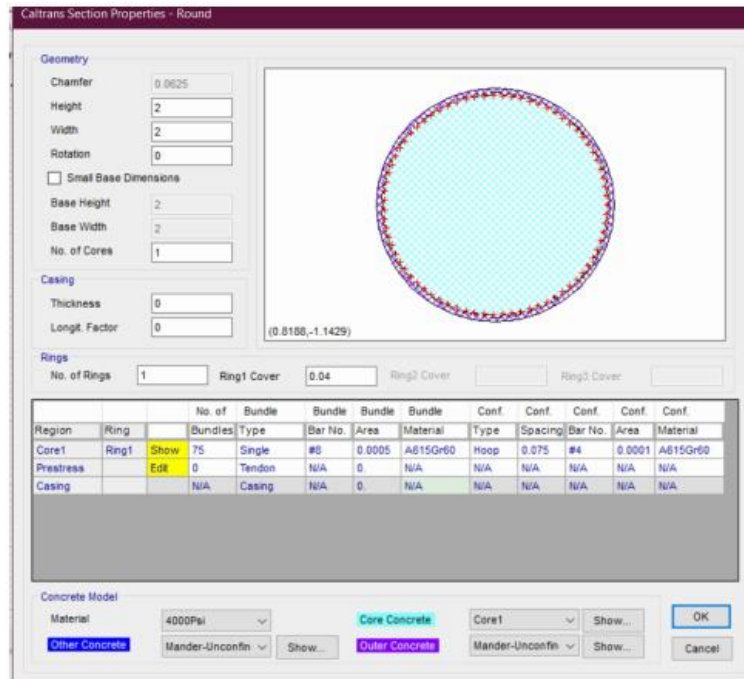
Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE SECCIONES

Se procede a definir las secciones de los elementos estructurales.

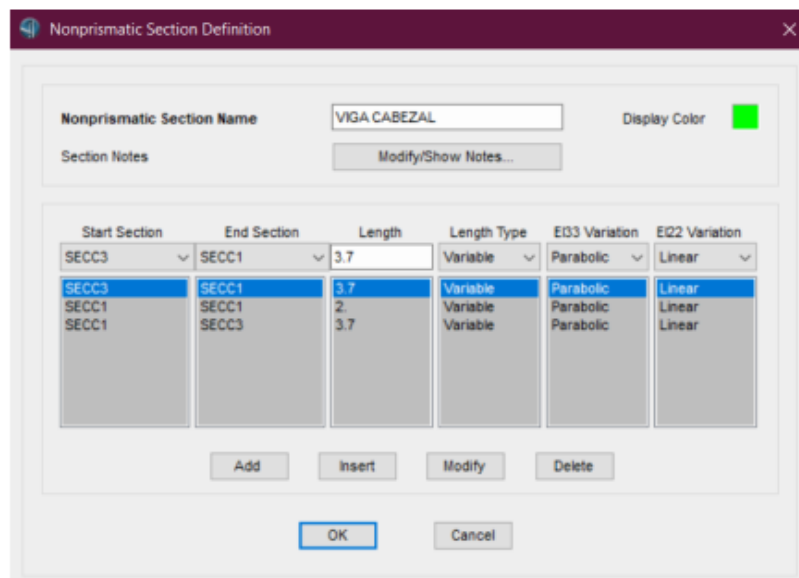
- Definición de pilar:

Figura 79: Definición del pilar



Fuente: Elaboración propia

Figura 80: Definición de viga cabezal

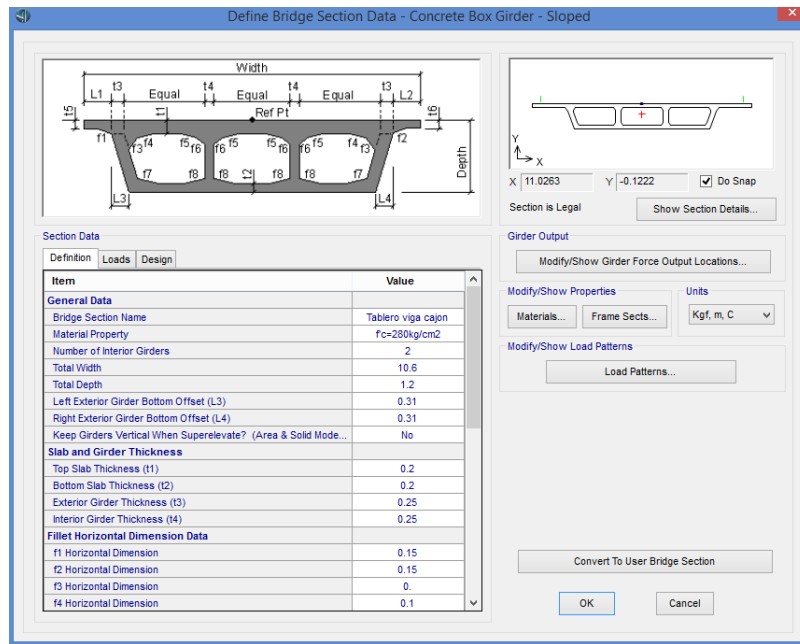


Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE SECCIÓN DE PLATAFORMA

Se procede a definir el nombre, propiedad del material del tablero, ancho, alto, dimensiones del tablero según predimensionamiento, el esfuerzo de compresión del concreto a usarse será de $f'c=280\text{kgf/cm}$.

Figura 81: Definición de sección de plataforma

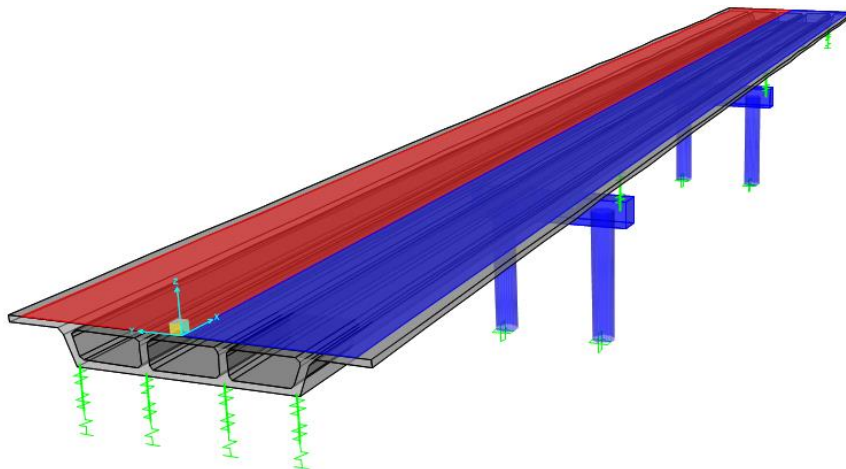


Fuente: Elaboración propia

MODELO TRIDIMENSIONAL DEL PUENTE

Luego de proceder a definir las características geométricas del tablero y pilares, se dibuja el puente en planta y en elevación.

Figura 82: Modelo tridimensional del puente



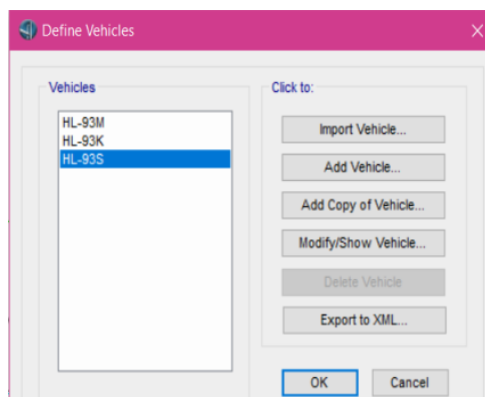
Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE CARGAS

Las cargas vivas se consideran sobre la calzada del tablero llamado deck, son las establecidas para los camiones tipo o carga uniforme por carril. Siguiendo las especificaciones del AASHTO LRFD. La carga viva vehicular (camión de diseño HL-93), es una combinación de tres diferentes cargas:

4. HL-93K Diseño Camión
5. HL-93M Diseño en tándem
6. HL-93S Diseño del carril de carga

Figura 83: Camión de diseño

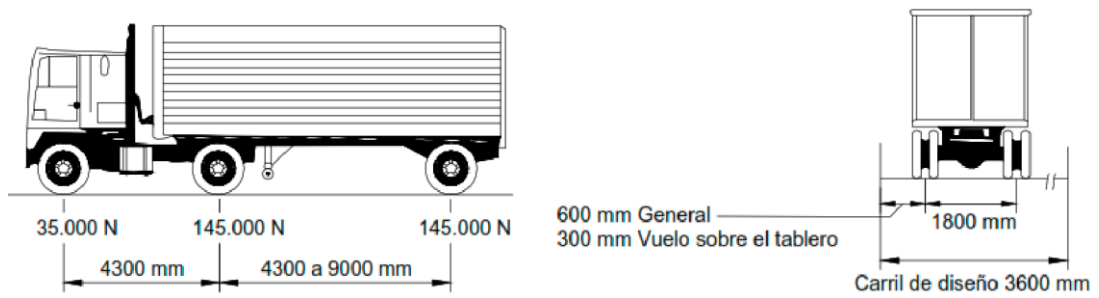


Fuente: Elaboración propia

HL-93K DISEÑO CAMIÓN

Consiste en un camión que tiene tres ejes, uno delantero y dos ejes traseros; el eje delantero pesa 8kip (35 kN o 3,629 kg) y dos ejes traseros con un peso 32kip (145 kN o 14,515 kg). La distancia entre los ejes delantero y trasero es de 14' (4.30 m) y la de los dos ejes traseros se puede variar entre el 14' (4.30 m) a 30' (9.0m) para lograr el caso más desfavorable en la posición de la carga a ser evaluada en el cálculo. El neumático a distancia neumático en todos los ejes es de 6' (1.80 m), se incrementa en 33% por carga dinámica.

Figura 84: camión de diseño HL-93K



Fuente: Elaboración propia

Figura 85: Definición de camión de diseño HL-93K

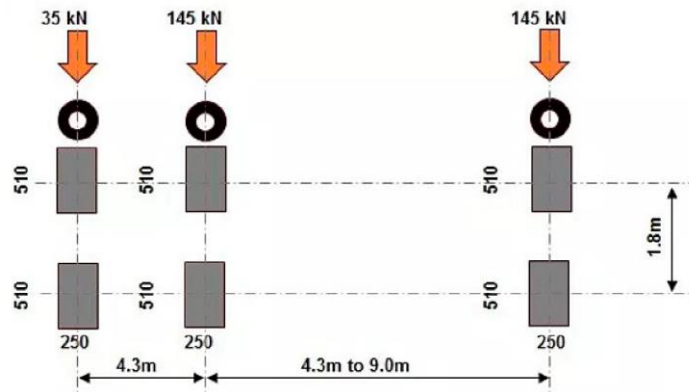
The screenshot shows the 'Vehicle Data' software interface. The 'Vehicle Name' is set to 'HL-93K' and the 'Design Type' is 'Vehicle Live'. The 'Source' is 'AASHTO.xml'. The 'Length Effects' are set to 'None' for both 'Axle' and 'Uniform'. The 'Vehicle Location in Lane' options are unchecked. The 'Load Plan' and 'Load Elevation' views show the truck's load configuration. The 'Vertical Loading...' button is active.

| Load Length Type | Minimum Distance | Maximum Distance | Uniform Load | Uniform Width Type | Uniform Width | Axle Load | Axle Width Type | Axle Width |
|------------------|------------------|------------------|--------------|--------------------|---------------|-----------|-----------------|------------|
| Leading Load | Infinite | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | 35.5858 | Two Points | 1.8288 |
| Fixed Length | 4.2872 | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | 142.3431 | Two Points | 1.8288 |
| Variable Length | 4.2872 | 9.144 | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | 142.3431 | Two Points | 1.8288 |
| Trailing Load | Infinite | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | | | |

Fuente: Elaboración propia

Planta de AASHTO HL-93K, Para camiones y Tándem, la zona de pisada del diseño de neumático se asume que es solo un rectángulo de con 20" (510 mm) y la distancia de 10" (250 mm). La presión de las llantas se asume que es parejo sobre la zona de contacto.

Figura 86: Camión de diseño en planta

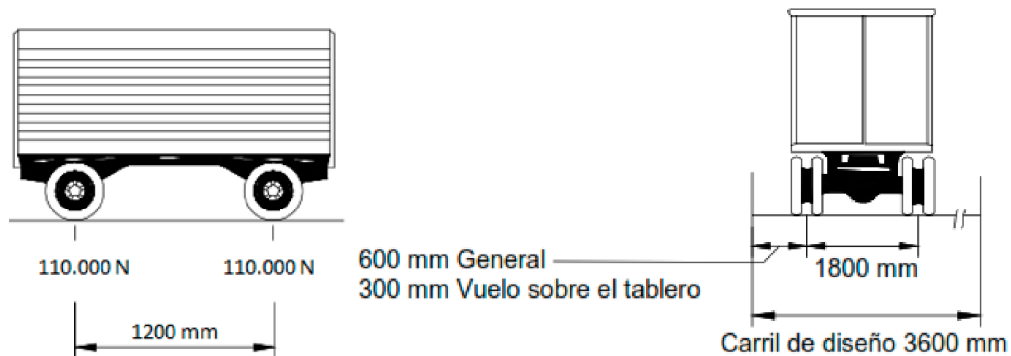


Fuente: Elaboración propia

HL-93M DISEÑO EN TÁNDEM

HL-93 Diseño en tándem consiste de 2 ejes espaciados 4' (1.20m) de longitud, cada una tiene un peso de 25kip (110 kN). La longitud entre los neumáticos de un eje es de 6' (1.80 m), se aumenta en 33% por carga dinámica.

Figura 87: Definición del tándem de diseño HL-93M



Vehicle Data

Vehicle Name: HL-93M Design Type: Vehicle Live Units: KN, m, C

Source: AASHTO.xml Convert to User Defined Notes...

Length Effects: Axle: None Modify/Show Uniform: None Modify/Show

Vehicle Location in Lane: Vehicle Applies To Shoulder (Adjacent Lanes Only)

Vehicle Data - Vertical Loading

Uniform Load Scale Factor: 1 Axle Load Scale Factor: 1.33

| Load | Length Type | Minimum Distance | Maximum Distance | Uniform Load | Uniform Width Type | Uniform Width | Axle Load | Axle Width Type | Axle Width |
|---------------|-------------|------------------|------------------|--------------|--------------------|---------------|------------|-----------------|------------|
| Trailing Load | Infinite | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | | | | |
| Leading Load | Infinite | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | 111.2056 | Two Points | 1.8288 | |
| Fixed Length | 1.2192 | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | 111.2056 | Two Points | 1.8288 | |
| Trailing Load | Infinite | | 9.3401 | Fixed Width | 3.048 | | | | |

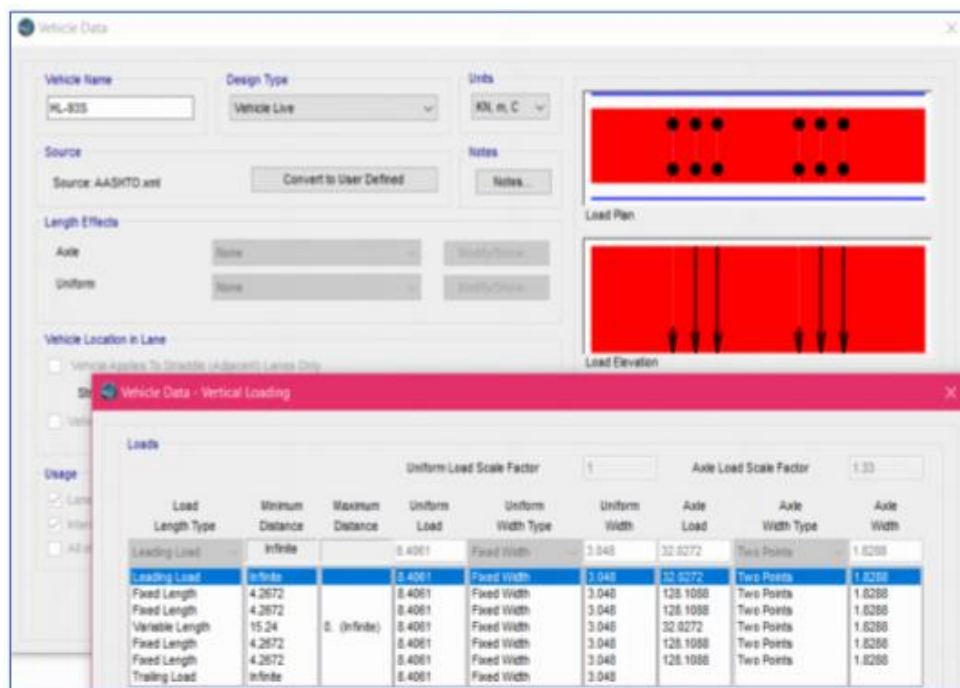
Fuente: Elaboración propia

HL-93S CARRIL DE CARGA

Las fuerzas momento (-) entre puntos de inflexión: 90% del resultado de un tren de carga combinado con el 90% del resultado del carril de carga. El tren de cargas consiste en 02 camiones de diseño espaciados a una longitud mínima de 50' (15m) considerando el eje delantero de un camión y el eje trasero del otro camión.

La distancia entre los dos ejes de 32 kips deberá ser de 14' (4.30m), para cada una del camion, los puntos de inflexión se evalua según la separación entre los camiones. Esta composición se define en CSI Bridge con el nombre HL-93S. se aumenta en 33% por carga dinámica, sin mayorar la carga uniformemente distribuido.

Figura 88: Definición del subsistema que evalúa el momento máximo en los apoyos interiores.

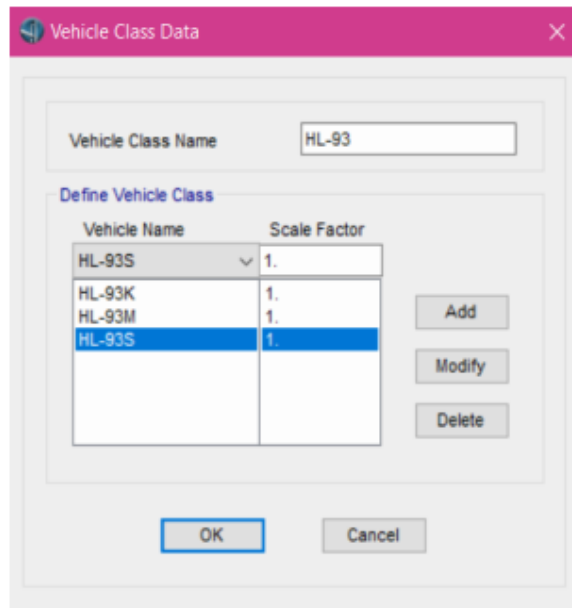


Fuente: Elaboración propia

CARGAS - CLASE DE VEHÍCULOS

Los tres sistemas de carga móvil se ensamblan en un vehículo clase y se le asigna el nombre de HL-93, cada sistema con un factor de 1.0.

Figura 89: Asignación de clase de vehículo

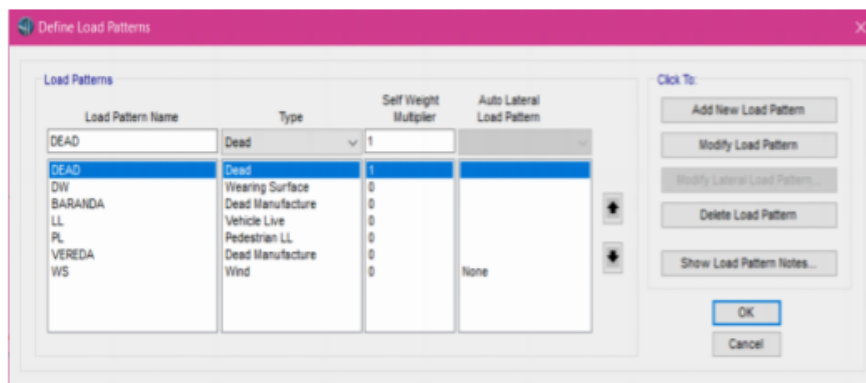


Fuente: Elaboración propia

DEFINICIÓN DE PATRONES DE CARGAS

Se asignaron las siguientes cargas al puente

Figura 90: Cargas asignadas al puente



Fuente: Elaboración propia

ASIGNACIÓN DE CASOS DE CARGA

Carga de baranda (BR)

La carga de baranda es en dirección de la gravedad, es una fuerza que se asigna como una carga lineal de 290 kg/m., en los extremos longitudinales del puente.

Figura 91: Definición carga de baranda

Bridge Line Load Distribution Definition Data

Load Name: BAR (ZQ) Units: Tonf, m, C

Load Direction: Load Type: Force, Coordinate System: GLOBAL, Direction: Gravity

Load Value: Value: 0.29

Load Transverse Location: Reference Location: Left Edge of Deck, Load Distance from Reference Location: 1.37

Load Vertical Location: Top Slab is Loaded at Midheight of its Thinnest Portion

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

Carga Muerta de la superficie de rodadura (DW)

La carga de superficie de rodadura (asfalto) es en dirección de la gravedad, se asigna por unidad de área.

$$DW = t * B * \gamma_{asf} = 165kg/m^2$$

Donde:

t : 0.075 m espesor de asfalto

B : 1.00 m Lado unitario

γ_{asf} : 2200 kg/m³

Figura 92: Asignación de carga de baranda

Bridge Area Load Distribution Definition Data

Load Name: DW Units: Tonf, m, C

Load Direction: Load Type: Force, Coordinate System: GLOBAL, Direction: Gravity

Load Value: Left Edge Value: 0.165, Right Edge Value: 0.165

Load Transverse Location: Left Reference Location: Left Edge of Deck, Left Load Distance from Left Ref. Location: 1.65, Right Reference Location: Right Edge of Deck, Right Load Distance from Right Ref. Location: 1.65

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

DATOS DEL PUENTE

Se precisa el inicio y el final del tramo total, los numero de tramos, asignación de los apoyos (extremos estribos e intermedio pilares).

Figura 93: Asignación es estación inicial y final

| Span Label | Start Station m | Length m | End Station m | Start Support | End Support |
|------------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------------|
| TRAMO 1 | 0. | 25. | 25. | ESTRIBO | PILAS |
| TRAMO 2 | 25. | 30. | 55. | PILAS | PILAS |
| TRAMO 3 | 55. | 25. | 80. | PILAS | ESTRIBO |

Fuente: Elaboración propia

Asignaciones de objetos de puente - Secciones de tablero

Figura 94: Asignación de sección del tablero

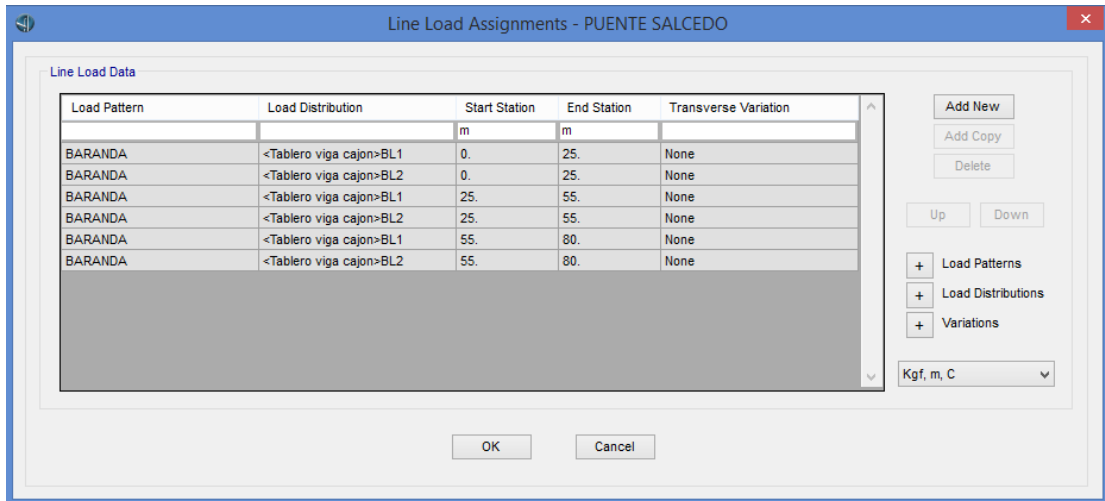
| Span | Section | Section Varies |
|---------|--------------------|----------------|
| TRAMO 1 | Tablero viga cajon | No |
| TRAMO 2 | Tablero viga cajon | No |
| TRAMO 3 | Tablero viga cajon | No |

Fuente: Elaboración propia

Asignaciones de carga líneaL

Se coloca la distancia de la línea de carga de la baranda en el lado longitudinal del puente.

Figura 95: Línea de carga distribuido de baranda

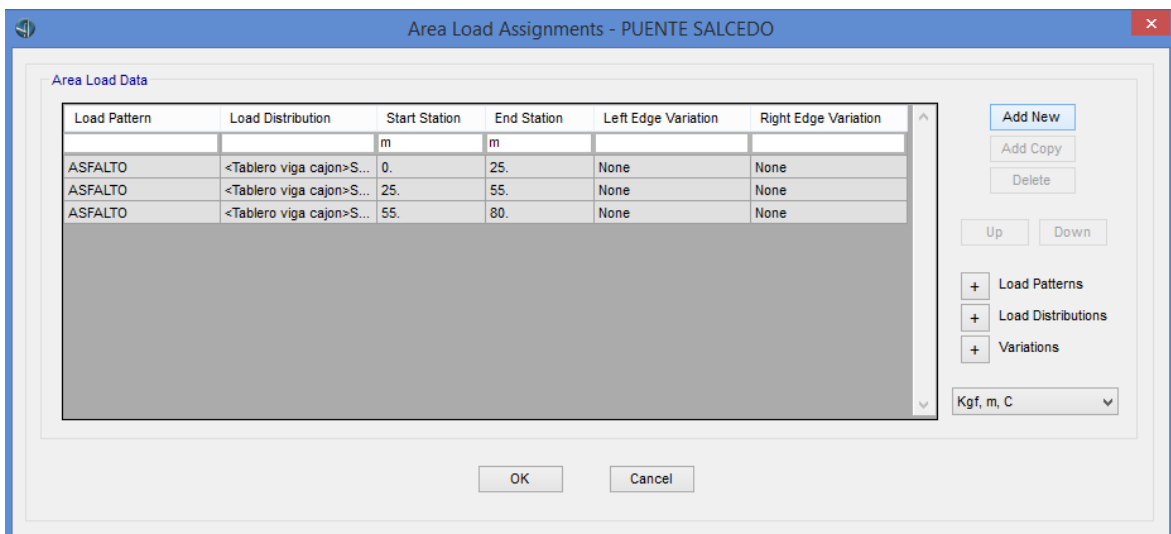


Fuente: Elaboración propia

Asignaciones de carga de área

Una vez definida las cargas distribuidas a las que estará sometida el tablero del puente, se debe indicar la longitud total sobre la cual se asignará la carga.

Figura 96: carga distribuida en el tablero



Fuente: Elaboración propia

CARGA DE VIENTO EN EL PUENTE (WS)

Se determinará con la siguiente formula:

$$V_{DZ} = 2.5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

Donde:

V_{DZ} : Velocidad del viento de diseño a la altura de diseño Z (km/h)

V_0 : Velocidad friccional (km/h)

V_{10} : Velocidad del viento se tomara $V_B = V_{10} = 160 \text{ km/h}$

V_B : Velocidad basica del viento igual a 160 km/h a una altura de 10 m

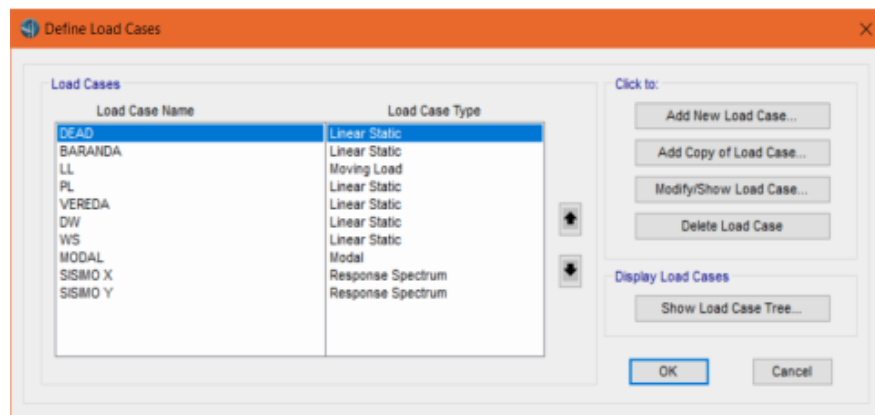
Z_0 : Longitud de friction del fetch o campo de viento aguas arriba (m)

Z : Altura de la estructura >10 m

DEFINIR LOS CASOS DE CARGA EN EL PUENTE

Se define los casos de carga para el análisis preliminar

Figura 97: Casos de carga

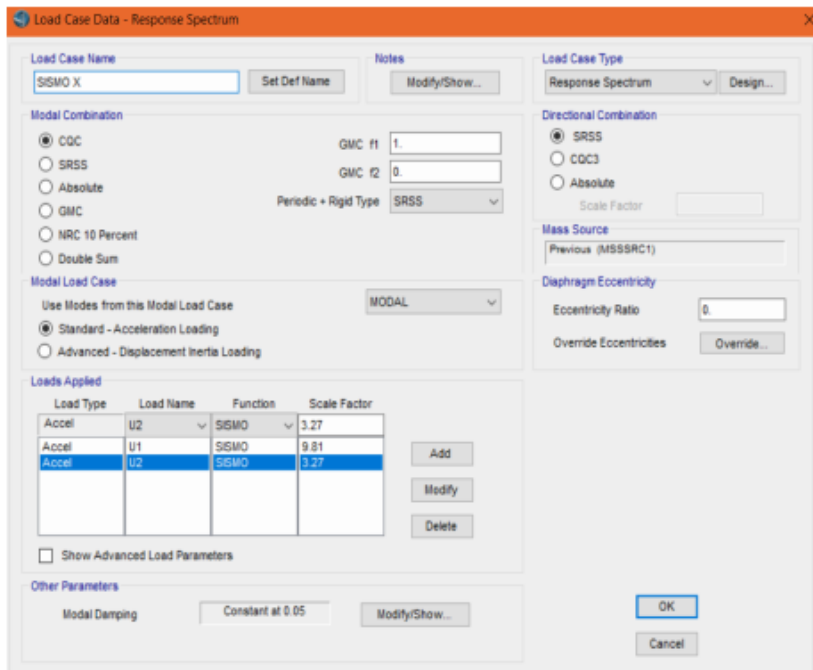


Fuente: Elaboración propia

a) El sismo se considera el 100% en la dirección "X" y 30% en la dirección "Y"

b) El sismo se considera el 100% en la dirección "Y" y 30% en la dirección "X"

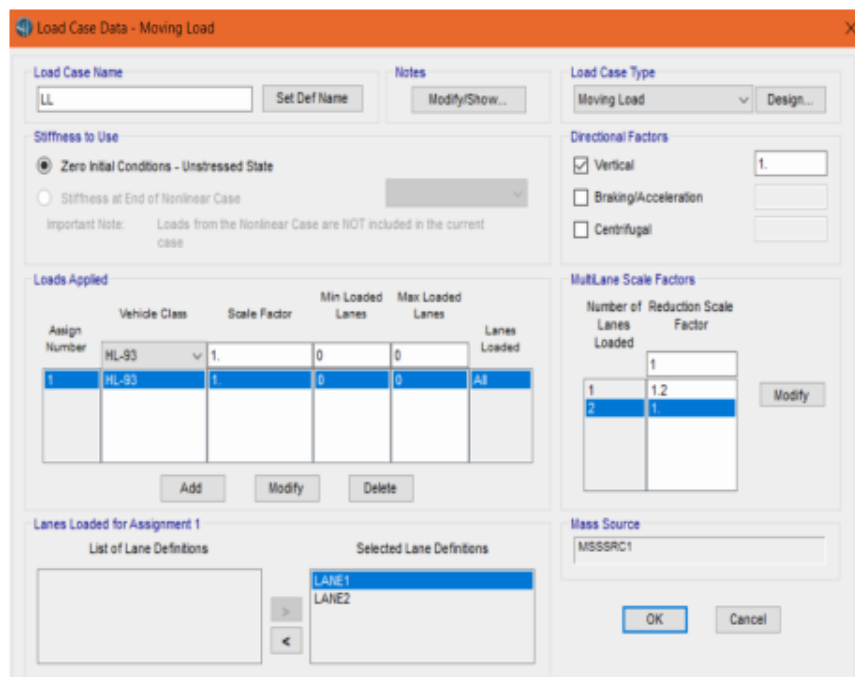
Figura 98: Sismo en la dirección "X"



Fuente: Elaboración propia

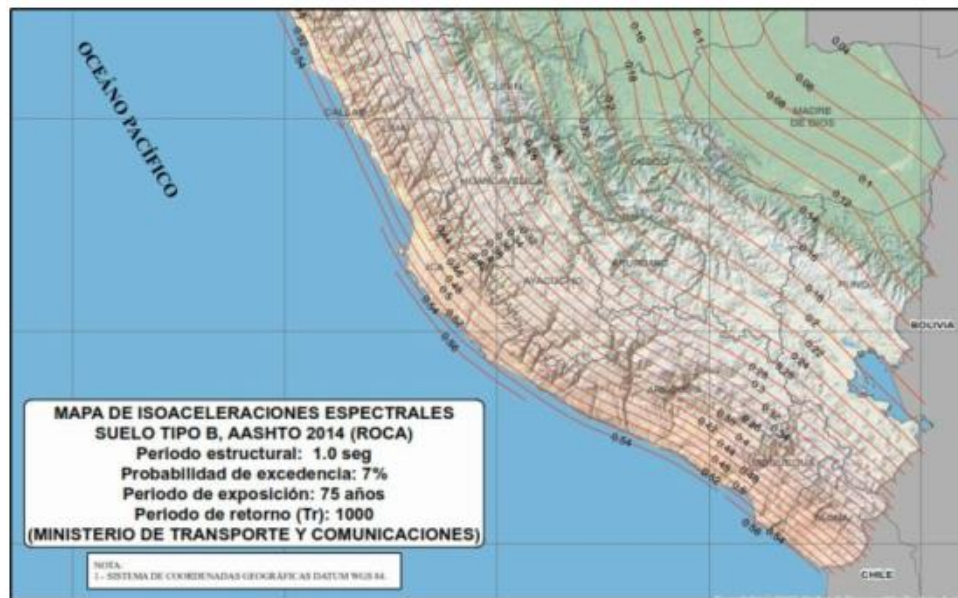
El factor de presencia múltiple se considera (1.2) para dos vías según (AASHTO LRFD).

Figura 99: Carga móvil camión HL-93



Fuente: Elaboración propia

Figura 102: Mapa de isoaceleraciones espectrales, suelo tipo B, AASHTO 2014 (Roca). Periodo estructural de 1.0 seg. ($S_1=0.23g$).



Fuente: Manual de Puentes MTC 2018

El procedimiento establece que en base a mapas de isoaceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento crítico y para periodos de 0.2s y 1.0s, se obtienen los parámetros de aceleración S_S y S_1 ,

$$A_S = F_{pga} PGA$$

$$S_{DS} = F_a S_s$$

$$S_{D1} = F_v S_1$$

Donde:

PGA : 0.24 de la ordenada para 0.0s del espectro de peligro uniforme.

S_s : 0.66 de la ordenada para 0.2s del espectro de peligro uniforme.

S_1 : 0.23 de la ordenada para 1.0s del espectro de peligro uniforme.

Los coeficiente F_{pga} , F_a y F_v , se obtienen de las siguientes tablas.

Tabla 34: Coeficientes de Sitio F_{pga} y F_a

| Clase de sitio | Aceleración pico del terreno o coeficiente de aceleración espectral para periodos cortos | | | | | |
|----------------|--|------|-----|------|------|------|
| | | ≤ | = | = | = | ≥ |
| | PGA | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| | Ss | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 |
| A | | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | | 1.2 | 1.2 | 1.10 | 1 | 1 |
| D | | 1.6 | 1.4 | 1.20 | 1.10 | 1 |
| E | | 2.5 | 1.7 | 1.20 | 0.90 | 0.9 |
| F | | a | a | a | a | a |
| Nota: | Use interpolación lineal para valores intermedios de Ss y PGA, donde Ss es el coeficiente de aceleración espectral en 0.2 segundos y PGA es el coeficiente de aceleración pico del terreno en roca, ambos obtenidos de los mapas de zonificación sísmica | | | | | |
| | "a": Se debe realizar una investigación geotécnica específica y análisis de respuesta dinámica del sitio | | | | | |

Fuente: Manual de Puentes MTC 2018

Tabla 35: Coeficientes de Sitio F_v

| Clase de sitio | Aceleración pico del terreno o coeficiente de aceleración espectral para periodos cortos | | | | | |
|----------------|--|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | | ≤ | = | = | = | ≥ |
| | S1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.50 |
| A | | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | | 1.7 | 1.6 | 1.50 | 1.4 | 1.3 |
| D | | 2.4 | 2 | 1.80 | 1.60 | 1.5 |
| E | | 3.5 | 3.2 | 2.80 | 2.40 | 2.4 |
| F | | a | a | a | a | a |
| Nota: | Use interpolación lineal para valores intermedios de Ss y PGA, donde Ss es el coeficiente de aceleración espectral en 0.2 segundos y PGA es el coeficiente de aceleración pico del terreno en roca, ambos obtenidos de los mapas de zonificación sísmica | | | | | |
| | "a": Se debe realizar una investigación geotécnica específica y análisis de respuesta dinámica del sitio | | | | | |

Fuente: Manual de Puentes MTC 2018

Siguiendo con lo establecido en la Norma, el espectro de diseño sísmico se obtiene mediante la estimación de los siguientes parámetros y consideraciones.

$$T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T \leq T_0$$

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} \quad T_0 \leq T \leq T_S$$

$$C_m = \frac{S_{D1}}{T} \quad T \geq T_S$$

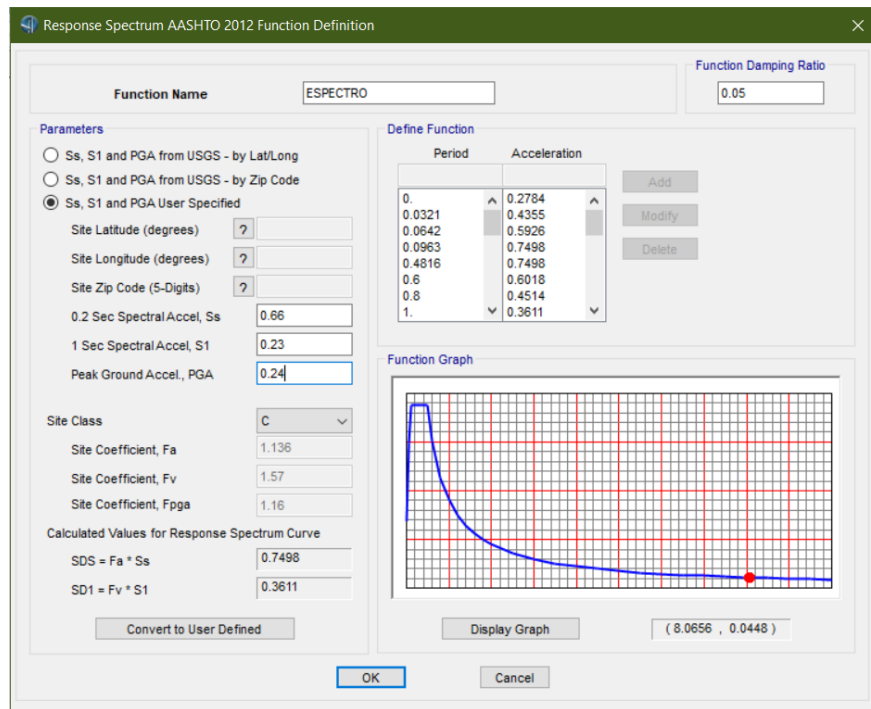
Al ser un puente ubicada en la región de Puno, la estructura se encuentra dentro de la clase de sitio C. se presentan los parámetros de espectro sísmico con los cuales se construyó el espectro de diseño elástico.

Tabla 36: parámetros del espectro sísmico

| PARÁMETROS AASHTO LRFD 2014 | |
|--------------------------------|--------|
| PGA | 0.24 |
| Ss | 0.66 |
| S1 | 0.23 |
| Fpga | 1.15 |
| Fa | 1.15 |
| Fv | 1.55 |
| As | 0.276 |
| SDS | 0.7498 |
| SD1 | 0.3611 |
| To | 0.094 |
| TS | 0.470 |
| TL | 10 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 103: Espectro de Diseño (Tr=1000años) para el Puesto.

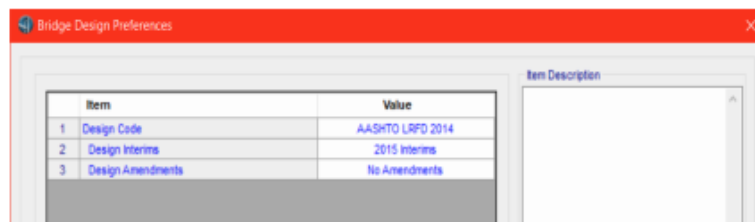


Fuente: Elaboración propia

CÓDIGOS O NORMAS

Se ha definido el código de diseño, según el AASHTO LRFD 2014.

Figura 104: Preferencia de código



Fuente: Elaboración propia

COMBINACIÓN DE LAS CARGA

Según la norma estas se definen como:

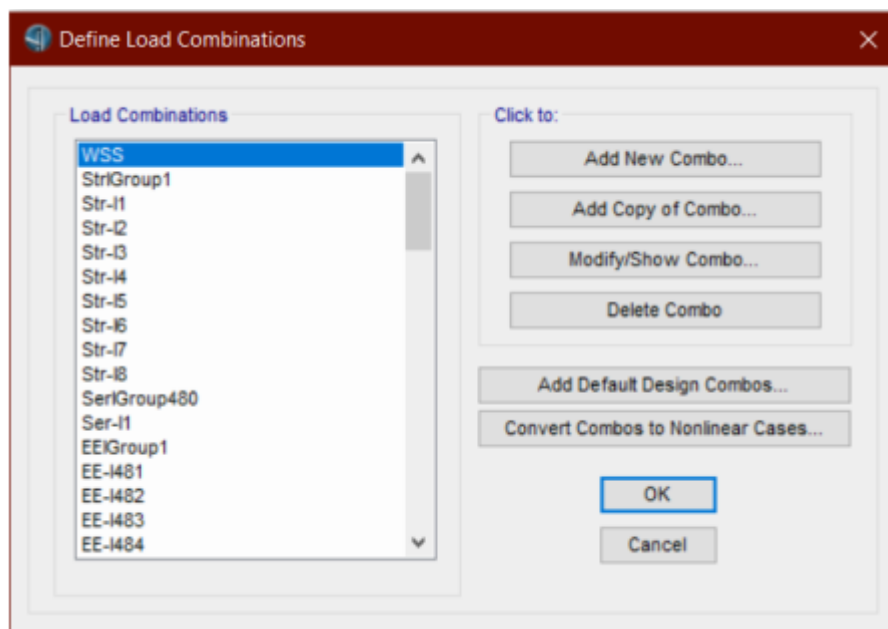
- DC : Carga muerta de componentes estructurales peso propio
- DW : Carga muerta de la superficie de rodadura y dispositivos auxiliares
- LL : Carga viva vehicular HL-93

- EQ : Carga de sismo
WS : Carga de viento sobre la estructura
PL : Carga viva de personal

Según la AASHTO LRFD, las combinaciones para el diseño son las siguiente:

- Resistencia I : $1.25DC + 1.5DW + 1.75 (LL+PL)$
Resistencia II : $1.25DC + 1.5DW + 1.35 (LL+PL)$
Resistencia III : $1.25DC + 1.5DW + 1.40 WS$
Resistencia V : $1.25DC + 1.5DW + 1.35(LL+PL) + 0.4$
Evento Extremo I : $1.25DC + 1.5DW + 0.5(LL+PL) + EQ$

Figura 105: Combinaciones de carga



Fuente: Elaboración propia

PROPIEDADES DEL AISLADOR

Antes de seleccionar el tipo de ai, se revisaron diferentes catálogos de fabricantes de aisladores LRB.

Tabla 37: Propiedades técnicas del aislador LRB

| TAMAÑO DEL DISPOSITIVO | | | | DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE | | | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------|--------------------|-----------------|--------|--------|
| Diametro aislador DI (mm) | Altura aislador H (mm) | Número de capas de caucho | Díametro del plomo DL (mm) | L (mm) | T (mm) | Cantidad orificios | Orificio Ø (mm) | A (mm) | B (mm) |
| 305 | 125-280 | 4-14 | 0-100 | 355 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 355 | 150-305 | 5-16 | 0-100 | 405 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 405 | 175-330 | 6-20 | 0-125 | 455 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 455 | 175-355 | 6-20 | 0-125 | 510 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 520 | 205-380 | 8-24 | 0-180 | 570 | 25 | 8 | 27 | 50 | 50 |
| 570 | 205-380 | 8-24 | 0-180 | 620 | 25 | 8 | 27 | 50 | 50 |
| 650 | 205-380 | 8-24 | 0-205 | 700 | 32 | 8 | 27 | 50 | 50 |
| 700 | 205-430 | 8-30 | 0-205 | 750 | 32 | 8 | 33 | 65 | 75 |
| 750 | 230-455 | 8-30 | 0-230 | 800 | 32 | 8 | 33 | 65 | 75 |
| 800 | 230-510 | 8-33 | 0-230 | 850 | 32 | 8 | 33 | 65 | 75 |
| 850 | 230-535 | 8-35 | 0-255 | 900 | 38 | 12 | 33 | 65 | 95 |
| 900 | 255-560 | 9-37 | 0-255 | 955 | 38 | 12 | 33 | 65 | 95 |
| 950 | 255-585 | 10-40 | 0-280 | 1005 | 38 | 12 | 33 | 65 | 95 |
| 1000 | 280-635 | 11-40 | 0-280 | 1055 | 38 | 12 | 40 | 75 | 115 |

Fuente: Adaptado de (Isolation Systems Dynamic, 2007)

Tabla 38: Propiedades de diseño del aislador LRB.

| Diámetro Aislador DI (mm) | PROPIEDADES DE DISEÑO | | | Desplazamiento Máximo, Dmax (mm) | Capacidad Carga Axial Pmax (kN) |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| | Rigidez Producida Kd (kN/mm) | Resistencia Característica Qd (kN) | Rigidez a la compresión Kv (kN/mm) | | |
| 305 | 0.2-0.9 | 0-65 | >50 | 150 | 450 |
| 355 | 0.2-1.2 | 0-65 | >100 | 150 | 700 |
| 405 | 0.3-1.6 | 0-110 | >100 | 200 | 900 |
| 455 | 0.3-2.0 | 0-110 | >100 | 250 | 1,150 |
| 520 | 0.4-2.3 | 0-180 | >200 | 300 | 1,350 |
| 570 | 0.5-2.8 | 0-180 | >500 | 360 | 1,800 |
| 650 | 0.5-3.5 | 0-220 | >700 | 410 | 2,700 |
| 700 | 0.5-4.2 | 0-220 | >800 | 460 | 3,100 |
| 750 | 0.7-4.7 | 0-265 | >900 | 460 | 3,600 |
| 800 | 0.7-5.3 | 0-265 | >1,000 | 510 | 4,000 |
| 850 | 0.7-6.1 | 0-355 | >1,200 | 560 | 4,900 |
| 900 | 0.7-6.1 | 0-355 | >1,400 | 560 | 5,800 |
| 950 | 0.7-6.1 | 0-490 | >1,800 | 610 | 6,700 |
| 1000 | 0.8-6.3 | 0-490 | >1,900 | 660 | 7,600 |

Fuente: Adaptado de (Isolation Systems Dynamic, 2007)


Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, BARRANTES MANN, LUIS ALFONSO JUAN docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ATE, asesor de la Tesis titulada: “ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN PUENTE CON AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB) EN EL INTERCAMBIO VIAL SALCEDO – PUNO” del autor JIMENEZ CONDORI, JUAN CARLOS, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 16.00% verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender el trabajo de investigación / tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Lima, 05 de Junio del 2021

| | |
|--|---|
| Apellidos y Nombres del Asesor: BARRANTES MANN, LUIS ALFONSO JUAN | |
| DNI 07795005 | Firma  |
| ORCID 0000-0002-2026-0411 | |