

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE TITULACION POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SISMICA DE UN PUENTE DISEÑADO
CON AISLADORES SISMICOS, ENTRE LOS TIPOS ELASTOMERICO CON
NÚCLEO DE PLOMO (LRB) Y DESLIZANTE CON SISTEMA DE PÉNDULO
DE FRICCIÓN (FPS) APLICADO AL PUENTE RIECITO UBICADO EN EL
DEPARTAMENTO DE PIURA.**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. LAMA LANDÁZURI, LUISA FERNANDA

Bach. VÁSQUEZ LAYZA, LUIS ADDERLY

ASESOR: Ing. MAMANI LEÓN, MARIO DANIEL

LIMA – PERU

2019

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta Tesis a Dios, ante todo, a mis padres que fueron, son y serán mi mayor sostén, por el apoyo persistente hacia mí hasta éste momento y siempre, a mis hermanos por su constante motivación hasta culminar esta gran etapa y a mis amigos por sus innumerables consejos.

Luisa Lama Landázuri

Dedico esta tesis a mi familia, por todo el apoyo brindado hasta el día de hoy, a mi papá para que mis éxitos lo celebre en el cielo, a mi madre quien es mi mayor motivación, y a mis amigos.

Luis Vásquez Layza

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Ricardo Palma, quien nos forjó en conocimientos, ética y profesionalismo en la Ingeniería Civil, hasta culminar esta etapa, a nuestros docentes por compartir su experiencia y conocimientos que nos facilitaron en el desarrollo de la presente tesis y a nuestros familiares por la guía del mismo.

Luisa Lama y Luis Vásquez.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Formulación del Problema	3
1.2.1 Problema General.....	3
1.2.2 Problemas Específicos	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Importancia y Justificación del estudio.....	4
1.5 Alcances y Limitaciones	5
1.6 Viabilidad.....	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes de la investigación	6
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	7
2.3 Estructura teórica y científica.....	8
2.4 Definición de términos básicos	11
2.5 Fundamentos Teóricos que sustentan a las hipótesis	14
2.6 Hipótesis.....	15
2.6.1 Hipótesis General.....	15
2.6.2 Hipótesis específicas	15
2.7 Variables	16

2.7.1	Variables dependientes.....	16
2.7.2	Variables independientes	16
CAPÍTULO III. MARCO METODOLOGICO.....		17
3.1	Tipo, método y diseño de la investigación.....	17
3.1.1	Tipo de investigación	17
3.1.2	Método de la investigación	17
3.1.3	Diseño de la Investigación	17
3.2	Población y Muestra.....	18
3.2.1	Población.....	18
3.2.2	Muestra	18
3.3	Operación de Variables	19
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
3.4.1	Técnicas	19
3.4.2	Instrumentos de recolección de datos	19
3.5	Descripción de procedimientos de análisis	20
CAPÍTULO IV. AISLAMIENTO SISMICO APLICADO EN PUENTES		
CONVENCIONALES		21
4.1	Puentes Convencionales.....	21
4.1.1	Filosofía de Diseño en puentes convencionales.....	21
4.2	Descripción del puente Riecito	24
4.2.1	Generalidades.....	24
4.2.2	Ubicación del puente vehicular “Riecito”.....	24
4.2.3	Descripción y tipología estructural del puente vehicular “Riecito”.....	25
4.2.3.1	Descripción del puente vehicular “Riecito”	25
4.2.3.2	Tipología estructural del puente vehicular “Riecito”.....	27

4.2.4	Material del puente vehicular “Riecito”	27
4.2.4.1	Concreto	27
4.2.4.2	Acero	28
4.2.5	Normativa.....	28
4.2.6	Acciones o cargas empleadas en el diseño convencional del puente Riecito	28
4.3	Puentes con aislador sísmico.....	29
4.3.1	Filosofía de diseño en puentes con aisladores sísmicos en la estructura	30
4.3.2	Procedimiento de análisis	33
4.3.3	Análisis Sísmico.....	35
4.3.3.1	Peligro Sísmico	35
4.3.3.2	Diseño de espectro de Respuesta	38
4.3.4	Método Simplificado	39
4.3.5	Método Multimodal Espectral	43
4.3.5.1	Espectro de Respuesta con aislador sísmico	44
4.3.6	Aisladores Sísmicos	45
4.3.6.1	Aisladores con núcleo de plomo	45
4.3.6.1.1	Dimensiones del aislador	47
4.3.6.1.2	Verificaciones.....	50
4.3.6.1.3	Control de Desempeño mínimo y máximo.....	51
4.3.6.1.4	Resumen del rendimiento del puente	53
4.3.6.2	Aisladores con sistema de péndulo friccional.....	53
4.3.6.2.1	Dimensionamiento	55
4.3.6.2.2	Control de rendimiento mínimo y máximo.....	59
4.3.6.2.1	Resumen del rendimiento del puente	60

CAPÍTULO V DESARROLLO DE ANÁLISIS SÍSMICO Y USO DE AISLADORES

APLICADO AL PUENTE RIECITO	62
5.1 Modelamiento del Puente Riecito	62
5.1.1 Definición de las características de los materiales de los elementos estructurales del puente	62
5.1.2 Definición de los elementos estructurales del puente Riecito.....	63
5.2 Desarrollo de Análisis Sísmico del Puente Riecito.....	68
5.2.1 Peligro Sísmico	68
5.2.2 Espectro de Diseño	77
5.2.3 Categoría Sísmica de Diseño	79
5.3 Aisladores Sísmicos	80
5.3.1 Procedimiento de Análisis	80
5.3.1.1 Método Simplificado	80
5.3.1.2 Análisis Multimodal Espectral.....	98
5.3.1.2.1 Espectro de Diseño con aislador sísmico.....	98
5.3.2 Diseño de aisladores	103
5.3.2.1 Diseño de aislador con núcleo de plomo	103
5.3.2.1.1. Dimensionamiento	104
5.3.2.1.2 Verificaciones de diseño por corte y estabilidad	106
5.3.2.1.3 Verificación de diseño final del aislador con núcleo de plomo.....	112
5.3.2.2. Diseño de aislador con sistema de péndulo friccional	115
5.3.2.2.1 Dimensionamiento	115
5.3.2.2.2 Verificación de diseño máximo y mínimo.....	117

CAPÍTULO VI APLICACIÓN DE LOS AISLADORES SÍSMICOS AL PUENTE

RIECITO	119
6.1 Resumen de rigidez de cada aislador	119
6.2 Comportamiento sísmico	119
6.2.1 Comportamiento sísmico con aislador con núcleo de plomo	120
6.2.1.1. Máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal.....	120
6.2.1.2. Máximo desplazamiento de la superestructura transversal.....	120
6.2.1.3. Máximo cortante en el pilar (longitudinal)	121
6.2.1.4. Máximo cortante en el pilar (transversal)	122
6.2.1.5. Máximo cortante en el pilar (longitudinal)	122
6.2.1.6. Momento máximo del pilar sobre eje transversal	122
6.2.1.7. Momento máximo de columna eje longitudinal	123
6.2.2 Comportamiento sísmico con aislador con sistema de péndulo friccional	124
6.2.2.1. Máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal.....	124
6.2.2.2. Máximo desplazamiento de la superestructura transversal.....	124
6.2.2.3. Máximo cortante en el pilar longitudinal.....	125
6.2.2.4. Máximo cortante en el pilar transversal.....	126
6.2.2.5. Máximo cortante en el pilar resultante.....	126
6.2.2.6. Momento máximo del pilar sobre eje transversal	126
6.2.2.7. Momento máximo de columna eje longitudinal	127

CAPÍTULO VII PRESENTACION Y COMPARACION DE RESULTADOS DE LOS

AISLADORES SISMICOS.....	128
7.1 Resultados de la investigación	128
7.2 Analisis y comparación de resultados	129
7.3 Contrastación de hipótesis.....	131

CONCLUSIONES	134
RECOMENDACIONES.....	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
ANEXOS	138
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	139
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables	140
Anexo 3. Modelamiento.....	141
Anexo 4. Planos	142
Anexo 5.Hojas de calculo	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operación de Variables.....	19
Tabla 2 Ubicación del puente Vehicular Riecito	24
Tabla 3 Datos Generales del Puente Vehicular Riecito	26
Tabla 4 Resistencia de diseño a la compresión del concreto del puente Riecito.....	28
Tabla 5 Especificaciones del acero del Puente Riecito”	28
Tabla 6 Requisitos de análisis mínimos para efectos sísmicos.....	35
Tabla 7 Definición de Clase de Sitio” Fuente: Manual de puentes del MTC.....	36
Tabla 8 Valores de Factor de Sitio Fpga.....	37
Tabla 9 Valores de Factor de Sitio Fa.....	37
Tabla 10 Valores de Factor de Sitio Fv” Fuente: Manual de puentes del MTC.....	38
Tabla 11 Valores mínimos y máximos de Kd y Qd.....	52
Tabla 12 Valores máximos y mínimos para los factores de modificación del sistema	52
Tabla 13 Propiedades de Material.....	56
Tabla 14 Valores máximos y mínimos de Kd y Qd.....	59
Tabla 15 Valores máximos y mínimos para los factores de modificación del sistema.”	60
Tabla 16 Definición Clase de Sitio”	75
Tabla 17 Valores de factor de Sitio.....	75
Tabla 18 Factor de Sitio Fa.....	76
Tabla 19 Factor de Sitio Fv.....	76
Tabla 20 Valores para gráfico de espectro de respuesta” Fuente: Elaboración Propia	78
Tabla 21 Categoría sísmica de diseño.....	79
Tabla 22 Resultados método simplificado.....	97
Tabla 23 Valores para grafico de espectro de respuesta con aislamiento sísmico de puente Riecito	99

Tabla 24 Resultados método multmodal con análisis de elementos finitos”	102
Tabla 25 Rigideces de aislador por apoyo”	119
Tabla 26 Periodo fundamental del puente Riecito	128
Tabla 27 Resumen y comparación desempeño del puente	129
Tabla 28 Variación porcentual entre resultados.....	132
Tabla 29 Comportamiento sismico resultante con uso de aisladores sismicos tipo LRB y FPS.....	133

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de funcionamiento de péndulo friccionante.....	10
Figura 2. Elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y Sistema de péndulo friccional (FPS).....	15
Figura 3. Ubicación del puente vehicular Riecito.....	25
Figura 4 Vista en elevación y planta de la superestructura del puente Riecito.....	25
Figura 5 Sección de vigas del puente Riecito	26
Figura 6. Elevación del puente continuo Riecito”	27
Figura 7 Curva de Respuesta de Aceleración	30
Figura 8. Curva de Respuesta de Desplazamientos	31
Figura 9. Espectro de Respuesta de Aceleración	31
Figura 10. Espectro de Respuesta de Desplazamiento.....	32
Figura 11. Cuadro de histéresis con sistema de aislamiento.....	32
Figura 12. Espectro de repuesta de diseño con puentes con sistema de aislamiento GSID, 2014	33
Figura 13. Espectro de respuesta de diseño convencional.....	39
Figura 14 Espectro de respuesta con aislamiento sísmico	45
Figura 15. Componentes principales de un aislador de núcleo de plomo.....	46
Figura 16. Cuadro de histéresis de un apoyo con núcleo de plomo.....	47
Figura 17. Componentes principales de un aislador FPS	54
Figura 18. Trazo del eje vial del puente.....	63
Figura 19. Definición del ancho del carril N° 1	64
Figura 20. Definición del ancho del carril N° 2.....	64
Figura 21. Definición de la sección transversal del puente	65
Figura 22. Definición de las medidas de viga cabezal.....	66

Figura 23. Definición de las medidas de la base del pilar	66
Figura 24. Definición de las medidas de la base del pilar	67
Figura 25. Modelamiento final de la sección del puente	67
Figura 26. Modelamiento final del puente Riecito en Csi Bridge,	67
Figura 27. Ubicación del proyecto a ejecutar, Puente Riecito	68
Figura 28. Distribución de ordenadas espectrales para Perú, para un periodo estructural de 0.00s con 5% de amortiguamiento y un periodo de retorno de 1000 años	69
Figura 29. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 0.0 seg.	70
Figura 30. Mapa de isoaceleraciones espectrales para calcular Ss	71
Figura 31. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 0.2 s.....	72
Figura 32. Distribución de ordenadas espectrales para Perú, para un periodo estructural de 1.0S con 5% de amortiguamiento y un periodo de retorno	73
Figura 33. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 1.0 seg.	74
Figura 34 Espectro de respuesta de diseño convencional del puente Riecito.....	79
Figura 35. Espectro de respuesta del puente Riecito con aislamiento sísmico	100
Figura 36. Espectro de Puente Riecito con aislamiento sísmico	103
Figura 37. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido longitudinal	120
Figura 38. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido transversal	121
Figura 39. Máximo cortante en el pilar en sentido longitudinal	121
Figura 40. Máximo cortante en el pilar en sentido transversal	122
Figura 41. Máximo momento del pilar sobre eje transversal.....	123
Figura 42. Máximo momento del pilar sobre eje longitudinal	123
Figura 43. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido longitudinal	124
Figura 44. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido transversal	125
Figura 45. Máximo cortante en el pilar en sentido longitudinal”	125

Figura 46. Máximo cortante en el pilar en sentido transversal	126
Figura 47. Máximo momento del pilar sobre eje transversal.....	127
Figura 48. Máximo momento del pilar sobre eje longitudinal	127

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Estados Limites	22
Ecuación 2 A_s	38
Ecuación 3 S_d	38
Ecuación 4 S_{d1}	38
Ecuación 5 Condicion espectro de respuesta	38
Ecuación 6 Condicion espectro de respuesta	38
Ecuación 7 Condicion espectro de respuesta	38
Ecuación 8 T_0	38
Ecuación 9 T_s	38
Ecuación 10 Desplazamiento inicial.....	39
Ecuación 11 Resistencia caracteristica de la unidad de aislador	40
Ecuación 12 Segunda Rigidez pendiente de la curva de Histeresis Bilineal	40
Ecuación 13 Calculo de carga por apoyo.....	40
Ecuación 14 Calculo de rigidez por apoyo	41
Ecuación 15 Rigidez de la sub estructura	41
Ecuación 16 Rigidez efectiva.....	41
Ecuación 17 Rigidez total efectiva	41
Ecuación 18 Desplazamiento de aisladores sismicos por apoyo	41
Ecuación 19 Rigidez de aisladores sismicos por apoyo	42
Ecuación 20 Carga lateral en cada elemento subestructura	42
Ecuación 21 Fuerza cortante de la columna por apoyo	42
Ecuación 22 Periodo efectivo	42
Ecuación 23 Ratio de maortiguamiento	43
Ecuación 24 Factor de amortiguamiento	43

Ecuación 25 Carga por aislador	43
Ecuación 26 Rigidez por aislador	44
Ecuación 27 Rigidez inicial	44
Ecuación 28 Desplazamiento fluido	44
Ecuación 29 Espectro con desplazamiento sismico.....	44
Ecuación 30 Diametro de nucleo de plomo	44
Ecuación 31 Area de contacto del LRB	47
Ecuación 32 Diametro del aislador LRB	48
Ecuación 33 Nueva area del plano LRB	48
Ecuación 34 Diametro total del aislador LRB	48
Ecuación 35 Espesor total del elastomero	49
Ecuación 36 Numero de capas de LRB	49
Ecuación 37 Altura total del aislador LRB	49
Ecuación 38 Comprobacion de medidas de LRB	49
Ecuación 39 Comprobacion de medidas LRB	50
Ecuación 40 Verificacion del limite de deformacion LRB.....	50
Ecuación 41 Estabilidad de carga vertical en estado no deformado LRB	50
Ecuación 42 Estabilidad de carga vertical en estado deformado LRB	51
Ecuación 43 Radio de curvatura FPS.....	51
Ecuación 44 Coeficiente de friccion FPS	55
Ecuación 45 Area de contacto FPS	55
Ecuación 46 Diametro del disco FPS.....	56
Ecuación 47 Diametro de superficie concava.....	56
Ecuación 48 Ancho total del aislador FPS.....	57
Ecuación 49 Altura total del aislador FPS	57

Ecuación 50 Area de apoyo minimo requerido FPS	57
Ecuación 51 Diametro minimo de apoyo.....	58
Ecuación 52 Espesor de la garganta FPS	58
Ecuación 53 Espesor de la placa concava FPS	58
Ecuación 54 Altura total FPS.....	58

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación, es la comparación de la respuesta sísmica que se obtiene en un puente de concreto armado tipo “Viga-Cajón” diseñado con aisladores con el uso de sistema de aislamiento de dos tipos: elastoméricos y deslizantes.

Para el análisis de comportamiento sísmico con tipo de aislador elastomérico, se ha considerado el aislador con núcleo de plomo (LRB), que es el uso más común en el Perú, y para el caso del tipo deslizante se ha hecho uso del aislador con sistema de péndulo friccional (FPS)

En este caso, se ha tomado en cuenta como puente a aplicar y evaluar este sistema, el puente Riecito, que está ubicado en el departamento de Piura, que es un puente tipo viga cajón de 3 tramos de 153 metros de Luz

Para el desarrollo de esta investigación se ha hecho uso de la guía de especificaciones de diseño para aislamiento sísmico de AASHTO (GSDI) del año 2014, con ayuda y soporte del modelamiento en el programa Csi Bridge

Con el desarrollo de esta investigación se logró calcular los objetivos de la misma, que fue hallar los desplazamientos en la estructura con el uso de los dos tipos de aisladores, siendo el uso de aislador LRB menor por mínima variación que el aislador FPS, en el caso de las fuerzas cortantes y momentos máximos de la estructura sucedió lo mismo, el uso de aislador con sistema de péndulo friccional es mayor al uso de aislador con núcleo de plomo, por tanto estructuralmente el comportamiento de ambos aisladores es muy parecido.

Palabras Claves: Aisladores sísmicos, Aislador con núcleo de plomo, Aislador con sistema de péndulo friccional, comportamiento sísmico, desplazamiento, periodo, rigidez, fuerza cortante, momentos máximos.

ABSTRACT

The objective of the present investigation is the comparison of the seismic response that is obtained in a reinforced concrete bridge type “Beam-Drawer” designed with insulators with the use of the insulation system of two types: elastomeric and sliding.

For the analysis of seismic behavior with type of elastomeric insulator, the lead core insulator (LRB) has been considered, which is the most common use in Peru, and for the case of the sliding type, the insulator with system has been used Friction Pendulum (FPS)

In this case, the Riecito bridge has been taken into account as a bridge to apply and evaluate this system, which is located in the department of Piura, which is a 3-section drawer beam bridge of 153 meters of Light

For the development of this research, the design specifications guide for AASHTO seismic isolation (GSDI) of 2014 has been used, with help and support of modeling in the Puente Csi program

With the development of this investigation the objectives of the same are calculated, that the displacements in the structure are found with the use of the two types of insulators, the use of the LRB insulator being smaller by minimum variation than the FPS insulator, in the case of the cutting forces and maximum moments of the structure the same thing happened, the use of an insulator with a friction pendulum system is greater than the use of an insulator with a lead core, therefore structurally the behavior of both insulators is very similar.

Keywords: Seismic insulators, Lead core insulator, Insulator with friction pendulum system, seismic behavior, displacement, period, stiffness, shear force, maximum moments.

INTRODUCCIÓN

El Perú está ubicado en una zona altamente sísmica, es por ello que se están considerando al pasar los años, la implementación de diseños y tecnologías en las estructuras como son el uso de aisladores sísmicos, en esta investigación se hará una comparación de dos tipos de aisladores sísmicos simulados en la estructura del Puente Riecito ubicado en el departamento de Piura.

En el capítulo I se describe esta problemática en mención, los problemas específicos, y los objetivos de la investigación para lograr solventar respuestas a estas problemáticas, también se describe la importancia y justificación que tiene el realizar esta investigación, los alcances y limitaciones y la viabilidad.

En el capítulo II de Marco teórico se mencionan los antecedentes de la presente investigación, así como investigaciones relacionadas al tema como fuente de recopilación, definimos los términos básicos para el desarrollo de esta tesis, y los fundamentos que sustentan nuestras hipótesis tanto la general como las específicas

En el capítulo III Se describe la metodología del proyecto, el método de la investigación, en esta tesis se ha hecho uso de la Norma AASHTO y la guía de especificaciones de diseño para aislamiento sísmico, así como también el programa CSI bridge.

En el capítulo IV se habla sobre los puentes convencionales como es el caso del puente Riecito, se describe las filosofías de diseño, ecuaciones y desarrollo de aislamiento sísmico.

En el capítulo V se ejecutan los cálculos para el diseño de aislamiento sísmico y diseño de los dispositivos, en el capítulo VI se aplican al modelamiento del puente Riecito obteniendo el comportamiento, En el capítulo VII Se presentan y comparan los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Los Puentes son elementos estructurales de vital importancia, contribuyen a un crecimiento económico, comunicación y permite el desarrollo del país, pues facilita las rutas de comercio disminuyendo tiempos de desplazamiento, así como la conectividad entre regiones, permite el transporte de habitantes y alimentos de forma segura, es por ello que se debe realizar un correcto diseño considerando los factores externos que puedan atentar contra la seguridad vital de la comunidad usuaria de los mismos, uno de ellos son los movimientos telúricos en la superficie de la tierra conocido como sismo.

Perú es uno de los 24 países que se localiza en el Cinturón de Fuego del Océano Pacífico, esta zona concentra el 85% de actividad sísmica mundial y zonas de subducción más importante; particularmente nuestro País está ubicado en el borde occidental de Sudamérica, lugar donde se produce la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, por tanto, nos encontramos en una zona potencialmente sísmica.

Cabe mencionar que una de las consecuencias del último sismo fuerte registrado en nuestro país del día 15 de agosto del 2007, con epicentro en el sur de la costa peruana, en Pisco, fue el colapso de distintos tipos de estructuras, entre ellos los puentes San Clemente y Huamaní.

Es por ello que ante esta problemática mundial, se han desarrollado nuevas tecnologías de uso estructural para mitigar o reducir el impacto en la estructura, una de ellas es el sistema con uso de aisladores sísmicos, dispositivos que pueden ser elastoméricos o deslizantes, colocados en los apoyos, en este caso para los puentes, donde descansa la superestructura, de modo que ante un evento sísmico, minimiza de manera significativa los daños que podría ocasionar en la estructura de no contar con los mismos.

La presente investigación aplica este sistema de aisladores sísmicos al puente vehicular llamado Riecito que es de estructura tipo viga cajón y se encuentra ubicado en el distrito de Sullana, en la provincia de Sullana, Departamento de Piura.

Con el objetivo de comparar, evaluar e identificar la mejor alternativa de comportamiento ante un evento sísmico, se usó 2 dispositivos o alternativas de aislador sísmico, elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) que son los de uso más común cuando se considera un diseño con aislador sísmico, sistema de péndulo friccional (FPS), que viene a ser un aislador del tipo deslizante.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cuál es la respuesta sísmica que se obtiene en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS)?

1.2.2 Problemas Específicos

- a) ¿Cuáles son los desplazamientos que se producen en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS)?
- b) ¿Cuáles son las fuerzas internas que se produce en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS)?
- c) ¿Cuál es la mejor alternativa estructural de aislador sísmico, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS) para el puente vehicular Riecito?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Comparar la respuesta sísmica que se obtiene en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizando con sistema de péndulo de fricción (FPS)

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Calcular los desplazamientos que se producen en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y del tipo deslizando con sistema de péndulo de fricción (FPS)
- b) Calcular las fuerzas internas que se produce en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizando con sistema de péndulo de fricción (FPS)
- c) Identificar la mejor alternativa estructural de aislador sísmico, entre los tipos elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y deslizando con sistema de péndulo de fricción (FPS) para el puente vehicular Riecito.

1.4 Importancia y Justificación del estudio

Es importante la evaluación de la respuesta de una estructura ante un sismo, en este caso, los puentes, ya que Perú está ubicado en una zona potencialmente sísmica por tanto la investigación se torna necesaria para el diseño considerando y exponiendo opciones o alternativas de solución que reduzcan el impacto en la estructura a consecuencia de los movimientos telúricos a los que nos encontramos expuestos.

El presente trabajo de investigación se realizó con el fin de comparar y evaluar la mejor opción de aislador sísmico según el comportamiento del puente ante un escenario de un sismo con las alternativas expuestas y desarrolladas en la presente investigación, que son los

dispositivos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y deslizantes con sistema de péndulo friccional (FPS)

Con este resultado, se busca dar a conocer el mejor dispositivo que se podría usar en un puente en general donde la vulnerabilidad sísmica sea un factor mayor al promedio en el mismo y así beneficiar a los pobladores, pues se enfoca en la seguridad vital de la comunidad usuaria de los puentes en general y la reacción de los mismos ante un escenario sísmico no solo evitando el colapso del mismo y reduciendo significativamente los daños si no también identificar la mejor alternativa que garantice la mayor cantidad de vida útil a la estructura.

1.5 Alcances y Limitaciones

Esta investigación se realizó tomando los datos del estudio del proyecto del puente ejecutado Riecito ubicado en el distrito de Sullana, provincia de Sullana, departamento de Piura.

Las conclusiones o resultados que se obtengan en la presente investigación pueden servir como aporte o referencia para posteriores investigaciones

El proyecto de la presente investigación se limita para puentes de concreto armado tipo viga cajón.

1.6 Viabilidad

La presente investigación es viable ya que se cuenta con la información básica necesaria, investigaciones y artículos publicados relacionados al tema se cuenta con la suficiente información bibliografía tanto física como digital, y expediente técnico del proyecto del puente Riecito para concluir y desarrollar los objetivos planteados, elaboración e interpretación de resultados.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Huerta C, (2017), en su tesis de investigación determina cuáles son las diferencias del comportamiento sísmico del Puente, diseñado con el método convencional de diseño sísmico resistente de puentes, y diseñado con aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo, su análisis sísmico del puente se basó en la norma AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design 2009, y concluyó con que al utilizar un aislador sísmico el amortiguamiento efectivo aumentó de 5% a 13%.

Minchan M, (2016), en su tesis compara la respuesta sísmica de un puente con diseño convencional y otro utilizando aisladores sísmicos, por lo que, solo se realizó en forma comparativa, obteniéndose resultados con el programa estructural SAP2000, realizó la comparación de los desplazamientos obtenidos de los puentes, se realizó mediante el método espectral multimodal y el método tiempo historia, mediante un ratio, y finalmente concluyó, que existe reducción de desplazamiento en la subestructura; en cambio en la superestructura los desplazamientos se incrementan, debido a que la disipación de energía se presenta en los aisladores mediante la deformación de los mismos.

Uliarte P, (2014) en su trabajo de investigación tiene presente un diseño estructural de un puente carretero, la zona es de alta peligrosidad sísmica por eso considera la incorporación de aisladores sísmicos tipo péndulo friccional entre el tablero del puente y la infraestructura del mismo. Se va a colocar un total de 16 aisladores. El terreno de fundación está compuesto de sedimento aluvial grueso, que presenta una muy buena capacidad de carga y baja compresibilidad, por lo cual se decidió adoptar un sistema de fundación directa de tipo superficial. La metodología de análisis fue

realizada con el software SAP 2000 y mediante la utilización del programa MATLAB. analizo los resultados para distintos registros sísmicos obteniendo reducciones en las solicitaciones superiores al setenta y cinco por ciento en la estructura aislada, comparada con la misma sin aislar. Se obtienen importantes reducciones de solicitaciones en estribos, pilas y fundaciones, como también importante incremento de desplazamientos relativos entre el tablero del puente y la subestructura del mismo.

Melga A (2015) en su tesis nos informa que en nuestro país usan principalmente aisladores elastoméricos, dejando de lado los del tipo deslizante, a pesar de que son los más usados a nivel mundial, por este motivo se enfoca más en los aisladores tipo deslizante: los de péndulo de fricción simple (FPS). y finalmente comprueba que es necesario realizar un análisis tiempo-historia cuando se usan aisladores de péndulo friccional, pues su alta no linealidad genera amplificaciones con respecto al análisis espectral de hasta 400% en aceleraciones y 50% en derivas máximas.

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

Murat E. (2015), realizo una investigación sobre la influencia de los parámetros de diseño sobre la respuesta de los puentes sísmicamente aisladas con el sistema de péndulo de fricción y concluyo que el aislamiento sísmico con el péndulo de fricción es menos eficaz para puentes que tienen características sub-estructura flexibles, en comparación con aquellos que son más rígido. Los puentes con gran superestructura flexible tienden a ser afectados menos de los componentes verticales de los movimientos del terreno. Los puentes con masa superestructura mayor adquieren desplazamientos aisladores más pequeños, pero plantean exigencias más grandes en el soporte de carga los elementos de la sub-estructura. A diferencia de los puentes no

aisladas, las características de respuesta sísmica de puentes aisladas sísmicamente con el FPS fueron mínimamente afectados por inclinación.

Aguiar, R; Vergara F (2014) en su artículo publicado en la revista internacional de ingeniería de estructuras presenta un marco teórico sobre el diseño de aisladores FPS de la primera y segunda generación y de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo; de acuerdo a las investigaciones desarrolladas en la Universidad de Búfalo al 2011 y también desarrolla el análisis sísmico de una estructura con estos tres tipos de dispositivos de control pasivo y se comparan los resultados.

2.3 Estructura teórica y científica

La teoría estará basada en las especificaciones de la norma de diseño de puentes ASSHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATION del año 2017, esta norma está hecha para ser utilizada en diseño, evaluación y rehabilitación de cualquier tipo de Puente, estas especificaciones emplean la metodología de Diseño de Factor de Carga y Resistencia (LRFD) utilizando factores que se desarrollan a partir del conocimiento estadístico actual de cargas y rendimiento estructural.

Para el diseño de sistemas de aisladores sísmicos, nos basaremos en todas las especificaciones y fundamentos teóricas que se tomaran de la norma de diseño AASHTO LRFD Seismic Isolation Design del año 2014.

Aisladores de caucho con núcleo de plomo

El aislador sísmico de núcleo de plomo tiene un mayor amortiguamiento que el aislador natural. Se realiza una abertura entre las placas y el caucho, metiendo el núcleo de plomo, que es más ancho que el agujero, con tanta fuerza que se juntan y funcionan como uno solo.

Algunas de las propiedades principales del aislador de caucho con núcleo de plomo son; que en los apoyos brindan un mayor amortiguamiento de hasta el 30% debido a la capacidad que tiene el núcleo de absorción.

Las placas de acero están totalmente insertadas en el elastómero, estas se encuentran bien selladas y por lo tanto protegidas contra la corrosión. Los dispositivos se fabrican con el elastómero vulcanizado a las placas de conexión superior e inferior. Los apoyos también pueden suministrarse con placas de anclaje adicionales, permitiendo mayor facilidad de reemplazo en operaciones de mantenimiento

Es tipo de dispositivo da una significativa disipación de energía durante terremotos que conducen a un diseño de la estructura optimizado reduciendo así los costos

Aisladores de base utilizando péndulo de fricción

Los apoyos de péndulo de fricción son aisladores sísmicos que se instalan en los apoyos (entre la estructura y el cimiento de la estructura) para poder proteger la estructura soportada de los movimientos sísmicos. Es bastante rentable utilizar el péndulo de fricción en estructuras que resistan elásticamente los movimientos sísmicos y no presentar ningún tipo de daño estructural.

Los péndulos de fricción una de sus características principales es que pueden alargar el periodo natural de la estructura aislada y así evitar las fuerzas telúricas más fuertes.

Durante un sismo la estructura soportada se mueve en pequeñas oscilaciones pendulares ya que los desplazamientos inducidos por terremotos se producen principalmente en los apoyos, las cargas laterales transmitidas a la estructura se reducen significativamente

Las propiedades principales de un aislador FPS son:

En condición de servicio, los dispositivos transmiten las cargas verticales y permiten los desplazamientos en forma horizontal; por lo tanto cuando ocurre algún movimiento sísmico estos brindan una mayor flexibilidad lateral debido a que tiene un deslizamiento sobre su superficie curva; esto produce una disipación de energía debido a que hay una fricción dinámica entre la superficie deslizante y el material de alto rendimiento y finalmente a la hora

de recentrarse el dispositivo este consigue combinar la gravedad con las características geométricas que tiene.

Como una de las ventajas que nos proporciona este aislador sísmico es que podemos obtener una estructura más ligera y económica y brinda una mayor seguridad a la estructura y a los usuarios

Esquemmatización del aislador péndulos friccionantes

Para el diseño de péndulos friccionante hay que tener en cuenta principalmente que el periodo de vibración es directamente proporcional al radio de la curvatura de la superficie que es cóncava. Lo que hace que este tipo de dispositivo obtenga una disipación de energía es por la fricción que hay entre la lenteja de teflón y la superficie cóncava, pero a la vez también actúa la carga axial que crea una fuerza que genera la restauración del dispositivo

El esquema de funcionamiento del aislador de péndulo de fricción se demuestra en la figura N° 1

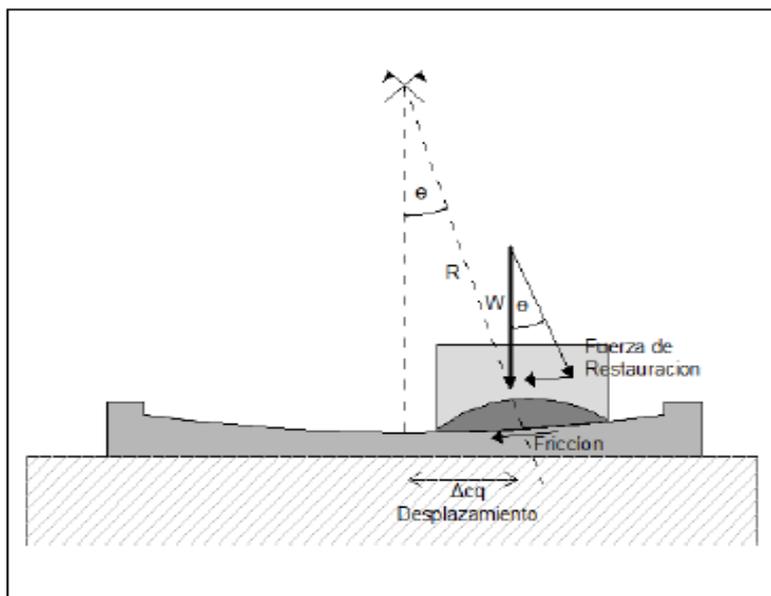


Figura 1. Esquema de funcionamiento de péndulo friccionante
Fuente: Uliarte J, (2014)

Criterios para el diseño del aislador de péndulo friccionante

La capacidad de desplazamiento del dispositivo deberá ser mayor o igual que la máxima demanda calculada en el diseño. El cálculo de la demanda debería considerar el máximo sismo considerado y los efectos del envejecimiento, cambios de temperatura, etc. En las propiedades del elemento.

A diferencia de los LRB, los FPS debido a su configuración y construcción en acero, tienen gran capacidad de carga axial, gran capacidad de desplazamiento y no tienen problemas de estabilidad.

Una vez que se conocen las propiedades reales del dispositivo que se instalara en el sistema de aislamiento se procede con el diseño de la superestructura.

2.4 Definición de términos básicos

Diseño Desplazamiento: En un aislador es el desplazamiento lateral máxima a través de un aislador en la dirección longitudinal dirección para la carga terremoto longitudinal, y en la dirección transversal para la carga terremoto transversal. No incluye el desplazamiento de la subestructura de soporte del aislador. Este desplazamiento se usa principalmente para calcular la rigidez efectiva de cada aislador para uso en métodos elásticos equivalentes de análisis, ya sea en las direcciones longitudinales o transversales. (AASTHO GSID, 2014, p.5)

Amortiguador efectivo: “Es el valor de amortiguamiento viscoso equivalente correspondiente a la energía disipada durante respuesta cíclica en el desplazamiento máximo del centro de rigidez de la estructura aislada”. (AASTHO GSID, 2014, p.5)

Aislamiento del sistema: “Es la colección de todos los elementos que proporcionan rigidez vertical, la flexibilidad lateral, y la amortiguación en el sistema en la interfaz de aislamiento. Incluye las unidades de aislamiento y el sistema de retención elástico, si se utiliza uno, el sistema de aislamiento no incluye la subestructura y la cubierta.” (AASTHO GSID, 2014, p.5)

Efectiva rigidez: “Es el valor de la fuerza lateral en el instante de máximo desplazamiento lateral en el aislamiento sistema, o un elemento del mismo, dividido por el máximo desplazamiento lateral.” (AASHTO GSID, 2014, p.5)

Puente: Es una estructura de servicio, en el sentido que se proyecta para permitir que una vía de cualquier índole pueda continuar en sus mismas condiciones de proyecto al verse interrumpida por el cruce natural, como un río, una quebrada, una vía de agua u otra vía de circulación, que de no ser así se vería imposibilitado su continuación y por lo tanto interrumpido el servicio.

Superestructuras: Son los componentes estructurales del puente que constituyen el tramo horizontal conformado por:

Tablero. - Es el componente, con o sin superficie de rodamiento, que soporta las cargas de rueda en forma directa y es soportado por otros componentes

Estructura Portante. - Es el componente estructural que soporta al tablero y se apoya en sus extremos con la subestructura, es decir transmite las cargas procedentes del tablero a los estribos y/o pilas.

Accesorios del tablero. - Son elementos que sirven para dar funcionalidad al puente y seguridad tanto a los vehículos como a los peatones: cordón barrero, barandas, barreras

Subestructura: Son los componentes estructurales del puente que soportan el tramo horizontal, los componentes más importantes son:

Pilares. - Son elementos de apoyo intermedios los cuales conducen los esfuerzos de la superestructura hacia las fundaciones están diseñados para resistir presiones hidráulicas, cargas de viento, cargas de impacto, etc. Pueden ser de concreto o acero. Los pilares pueden ser de una sección transversal constante o variable eso dependerá

de la altura del pilar, también pueden tener una sección llena o una sección hueca la elección de los pilares depende de la constructibilidad y la estética. Podemos clasificar a los pilares en dos tipos:

Pilares-pared: “En general abarcan el ancho total de las vigas principales. Según sea la conformación deseada se puede terminar en los bordes de las vigas principales, o pueden sobresalir respecto de ellos, o aún se pueden retirar con respecto a dichos bordes. Los Pilares-pared son muy aconsejables por razones hidráulicas. Para ríos navegables, en general llegan a ser muy gruesos para su seguridad en casos de colisión de barcos. En cuanto a su configuración, se debe prevenir contra la adopción de pilares-pared demasiado delgados. En la Figura siguiente se presenta diferentes posibilidades de forma para la sección transversal.” (Aranís C., 2006).

Los aisladores sísmicos: Es una herramienta de alta tecnología que protege a la estructura de los efectos destructivos de un sismo. Lo hace colocándose estratégicamente en partes específicas de la estructura, de esa manera se separa la base de la estructura de la tierra y así, los movimientos del suelo producidos por un terremoto o sismo, no afectan la estructura.

Es decir, la idea es separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su cimentación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija.

Aislador de Péndulo de Fricción: Consiste de un deslizador (resbalador) articulado sobre una superficie de acero inoxidable esférica Características de estos apoyos son la superficie deslizante esférica de acero inoxidable pulido y el deslizador articulado, que está revestido con un material compuesto de alta capacidad de soporte basado en

teflón que tiene un bajo coeficiente de fricción (aproximadamente 5 a 7%). Los apoyos están sellados e instalados con la superficie deslizante boca abajo para evitar la contaminación de la interface de deslizamiento.

Aisladores de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo (LRB): Los aisladores con núcleo de plomo se presentan como una mejora de los LRD, puesto que el plomo incrementa el amortiguamiento y evita los desplazamientos horizontales excesivos. El núcleo de plomo se coloca para producir numerosos ciclos histeréticos estables. En el proceso de fabricación de estos aisladores, las láminas de caucho se intercalan con las láminas de acero dentro de un molde de acero que tiene la forma final del aislador, y luego se aplica presión a las láminas a una temperatura muy alta, alrededor de los 140 °C, por un tiempo que varía entre 4 a 8 horas. Esto permite al aislador ser muy flexible horizontalmente debido al caucho, y muy rígido verticalmente por la presencia de las láminas de acero que impiden la deformación vertical del caucho (Aguiar,R. 2008, P 58).

2.5 Fundamentos Teóricos que sustentan a las hipótesis

Según las diferentes fuentes de información y bibliografía publicada referentes al tema de investigación, se expone y concluye que las estructuras con el uso de apoyos con sistema de péndulo friccional tienen un mejor desempeño ante el escenario de un sismo que un apoyo elastomérico.

El sistema de péndulo friccional brinda mayor flexibilidad a la estructura ya que los periodos modales son mayores que los del tipo elastoméricos, esto produce un menor impacto en la estructura el puente, minimizando los daños

En la Figura N°2 se muestran los 2 tipos de aisladores sísmicos a tratar en esta investigación, a la izquierda el aislador de tipo elastomérico con núcleo de plomo y adyacente a ella el aislador deslizante con sistema de péndulo friccional



Figura 2. Elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y Sistema de péndulo friccional (FPS)
Fuente: Tecno AV - Chile

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis General

La respuesta sísmica que se obtiene en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, entre los tipos deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS) mejora en un 10% comparándolo con los de tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

2.6.2 Hipótesis específicas

- a) El desplazamiento que se produce en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) es un 10% mayor que el que se produce con el del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS)
- b) Las fuerzas internas que se produce en el puente vehicular Riecito diseñado con aisladores sísmicos, del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) serán un 5% mayores que el que se produce con el del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS)
- c) La mejor alternativa estructural de aislador sísmico, es del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS) en comparación con el del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

2.7 Variables

2.7.1 Variables dependientes

- a) Aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo
- b) Aisladores sísmicos con sistema de péndulo friccional

2.7.2 Variables independientes

- a) Respuesta sísmica de la estructura
- b) Desplazamientos de la estructura
- c) Fuerzas internas de la estructura
- d) Mejor alternativa estructural

CAPÍTULO III. MARCO METODOLOGICO

3.1 Tipo, método y diseño de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que realizamos es descriptiva, aplicada, explicativa, tipo correlacional no experimental.

Tamayo, M. (2004) "es el estudio y la aplicación de la investigación a problemas concretos, en circunstancias y características concretas. Esta forma de investigación dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías." (p.43), por tanto, esta investigación es del tipo aplicado.

Hernández, Fernández, Baptista (2010) "su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables" (p.84), a su vez, "los estudios correlacionales tienen como finalidad determinar el grado de relación o asociación existente entre dos o más variables" (Arias, 2012. p.25) por lo tanto, esta investigación es explicativa - correlativa Se intentará determinar que aislador sísmico es el más adecuado a utilizar, de acuerdo a lo establecido en la norma E.030.2016.

Arias, F. (2012) "se realizan sin la manipulación de las variables, sólo se observan los fenómenos para un posterior análisis". (p.42), por lo tanto, esta investigación es no experimental.

3.1.2 Método de la investigación

El método de la investigación fue del tipo inductivo, El diseño empleado en la investigación es cuasi experimental.

3.1.3 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación fue del tipo no experimental, con el método transversal descriptivo.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

Gómez, M. (2006) "es el conjunto de todos los objetos de estudio que concuerdan con una serie de especificaciones [...] deben situarse claramente en torno a sus características de contenido, de lugar y en el tiempo"(p.110).

Por tanto, la población conocida en nuestra tesis fue el puente Riecito ubicado en el distrito de Sullana, provincia de Sullana, departamento de Piura.

3.2.2 Muestra

Muestra 1: Diseño del Puente Riecito con aislador sísmico del tipo elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

Muestra 2: Diseño del Puente Riecito con aislador sísmico del tipo deslizante con sistema de péndulo de fricción (FPS).

3.3 Operación de Variables

En la tabla N° 1 identificamos las variables dependientes e independientes

Tabla 1

Operación de Variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<p><u>.Variable Independiente:</u> *Aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo</p> <p>* Aisladores sísmicos deslizantes con sistema de péndulo de fricción</p> <p><u>. Variable dependiente:</u> Respuesta Sísmica</p>	<p>Milímetros</p> <p>Segundos</p> <p>Kg-cm</p>	<p>*Derivas</p> <p>*Periodos y Frecuencias</p> <p>* Esfuerzo Tracción</p> <p>*Esfuerzo por compresión</p> <p>*Esfuerzo por flexión</p> <p>*Esfuerzo cortante</p> <p>*Esfuerzo por torsión</p>
<p><u>.Variable Independiente:</u> *Aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo</p> <p>* Aisladores sísmicas deslizantes con sistema de péndulo de fricción</p> <p><u>. Variable dependiente:</u> Fuerzas internas</p>	<p>Kg-cm</p>	<p>* Esfuerzo Tracción</p> <p>*Esfuerzo por compresión</p> <p>*Esfuerzo por flexión</p> <p>*Esfuerzo cortante</p> <p>*Esfuerzo por torsión</p>
<p><u>.Variable Independiente:</u> Aisladores sísmicas elastoméricos con núcleo de plomo</p> <p>* Aisladores sísmicos deslizantes con sistema de péndulo de fricción</p> <p><u>. Variable dependiente:</u> Mejor alternativa estructural</p>	<p>Kg-cm</p> <p>Segundos</p> <p>cm4</p> <p>Kg/cm2</p> <p>Módulo de Young: N/m²</p>	<p>* Esfuerzo Tracción</p> <p>*Esfuerzo por compresión</p> <p>*Esfuerzo por flexión</p> <p>*Esfuerzo cortante</p> <p>*Esfuerzo por torsión</p> <p>*Periodo estructural</p> <p>*Rigidez</p> <p>Resistencia a la fluencia</p> <p>*Elasticidad</p>

Fuente: Propia

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas

Las técnicas que emplearemos serán las de observación, modelamiento dinámico con el programa SAP2000, CSI BRIDGE, análisis de documentos, registros y comparación de resultados.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos que utilizaremos para la recolección de los datos serán del tipo fichas técnicas de los aisladores, tablas para descarga de los resultados, información del

expediente técnico del proyecto, diagramas y el programa SAP200 para procesar los datos.

3.5 Descripción de procedimientos de análisis

El procedimiento de análisis implica el análisis tiempo historia, análisis estático, método de combinación modal espectral, modelamiento con el programa SAP2000, CSI BRIDGE estudio de esfuerzos, deflexiones, envolventes, desplazamientos, rigidez, elasticidad, deflexiones. Análisis espectral multimodal, Determinación de fuerzas y desplazamientos en cada dirección.

CAPÍTULO IV. AISLAMIENTO SISMICO APLICADO EN PUENTES

CONVENCIONALES

4.1 Puentes Convencionales

En el diseño y análisis sísmico que se realizó en el presente proyecto, según lo que se detalla en el expediente técnico, se siguió las directrices del AASHTO LRFD, y una serie de normativas mencionadas más adelante, esta normativa (AASHTO LRFD) es generalmente la que se considera en el diseño de puentes en el Perú, y también el Manual de puentes está en base a ello

4.1.1 Filosofía de Diseño en puentes convencionales

En esta investigación no se ahondará tanto en el diseño convencional de puentes de concreto armado ya que el objetivo como ha sido mencionado, es básicamente la comparación de dos tipos de aisladores aplicados al puente diseñado con sistema convencional, sin embargo, es necesario hacer mención de la filosofía de diseño en puentes convencionales y por tanto lo que ha sido considerado en el diseño actual del Puente.

En las especificaciones de diseño de puentes LRFD de AASHTO habla en la filosofía de diseño sobre, los estados límites, ductilidad, redundancia y la importancia operativa.

“Los puentes se deben diseñar considerando los estados límites especificados a fin de lograr los objetivos de construibilidad, seguridad y serviciabilidad, considerando debidamente los aspectos relacionados con la inspeccionabilidad, economía y estética”
(AASHTO LRFD, 2017)

a) Estados Límites

“Las componentes y conexiones deberán satisfacer la ecuación 1 para cada estado límite a menos que se especifique otra cosa. Para los estados límites de servicio y correspondientes a eventos extremos los factores de resistencia se deben tomar igual a

1.0. Todos los estados límite serán considerados de igual importancia.” (AASHTO LRFD, 2007).

$$\sum n_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$$

Ecuación 1

Donde:

n_i : Factor de modificación de las cargas: factor relacionado con la ductilidad, redundancia e importancia operativa

γ_i : Factor de carga: multiplicador de base estadística que se aplica a los efectos de fuerza

Q_i : Efectos de Fuerza

R_n : Resistencia Nominal

R_r : Resistencia Mayorada : ϕR_n

a.1) Estado Limite de Servicio

El estado límite de servicio se debe considerar como restricciones impuestas a las tensiones, deformaciones y anchos de fisura bajo condiciones de servicio regular. (AASHTO LRFD,2017)

a.2) Estado Limite de Fatiga y fractura

El estado límite de fatiga se debe considerar como restricciones impuestas al rango de tensiones que se da como resultado de un único camión de diseño ocurriendo el número anticipado de ciclos del rango de tensión. (AASHTO LRFD,2017)

a.3) Estado Limite de Resistencia

Se debe considerar el estado límite de resistencia para garantizar que se provee resistencia y estabilidad, tanto local como global, para resistir las combinaciones de cargas estadísticamente significativas especificadas que se anticipa que el puente experimentará durante su período de diseño. (AASHTO LRFD,2017)

a.3) Estados límites correspondientes a Eventos Extremos

Se debe considerar el estado límite correspondiente a eventos extremos para garantizar la supervivencia estructural de un puente durante una inundación o sismo significativo, o cuando es embestido por una embarcación, un vehículo o un flujo de hielo, posiblemente en condiciones socavadas. (AASHTO LRFD,2017)

b) Ductilidad

“El sistema estructural de un puente se debe dimensionar y detallar de manera de asegurar el desarrollo de deformaciones inelásticas significativas y visibles en los estados límites de resistencia y correspondientes a eventos extremos antes de la falla”. (AASHTO LRFD,2017)

“Se puede asumir que los requisitos de ductilidad se satisfacen para una estructura de hormigón en la cual la resistencia de una conexión es mayor o igual que 1,3 veces la máxima sollicitación impuesta a la conexión por la acción inelástica de los elementos adyacentes”. (AASHTO LRFD,2017)

c) Redundancia

“A menos que existan motivos justificados para evitarlas, se deben usar estructuras continuas y con múltiples recorridos de cargas”. (AASHTO LRFD, 2017)

“Los principales elementos y componentes cuya falla se anticipa provocará el colapso del puente se deben diseñar como elementos de falla crítica y el sistema estructural asociado como sistema no redundante. Alternativamente, los elementos de falla crítica traccionados se pueden diseñar como de fractura crítica.” (AASHTO LRFD, 2017, p.85)

“Los elementos y componentes cuya falla se anticipa no provocará el colapso del puente se deben diseñar como elementos de falla no crítica y el sistema estructural asociado como sistema redundante” (AASHTO LRFD, 2017)

d) Importancia operativa

“Se debe aplicar exclusivamente a los estados límites de resistencia y correspondientes a eventos extremos.” (AASHTO LRFD, 2017, p. 95)

“El Propietario puede declarar que un puente o cualquier conexión o elemento del mismo es de importancia operativa”. (AASHTO LRFD, 2017, p.96)

Para poder conocer y comparar las repuestas estructurales que brindan los aisladores deslizantes y elastoméricos en un puente, se ha tomado como objeto a simular, el puente Riecito, que es una estructura de concreto armado tipo viga-cajón ubicada en el distrito de Piura, que abarca como área de influencia a 13 centros poblados de la provincia de Sullana.

A continuación, se detalla la información básica acerca del proyecto del puente a usar.

4.2 Descripción del puente Riecito

4.2.1 Generalidades

El proyecto del Puente vehicular Riecito, nace como resultado de una necesidad de la población agricultora y moradora del Alto Chira, pues sirve como interconexión con el Ecuador y como vía alterna de comunicación de los pueblos de Alto Chira.

4.2.2 Ubicación del puente vehicular Riecito

A continuación, en la tabla N° 2 se presenta la ubicación del puente Riecito, estructura que será usada como puente en simulación para los aisladores sísmicos en la presente investigación

Tabla 2

Ubicación del puente Vehicular Riecito

LUGAR	Chilaco y Sullana
DISTRITO	Sullana
PROVINCIA	Sullana
DEPARTAMENTO	Piura

Fuente: Propia

En la figura N°3 se muestra la ubicación en el mapa de provincia y distrito de Piura donde está ubicado el proyecto

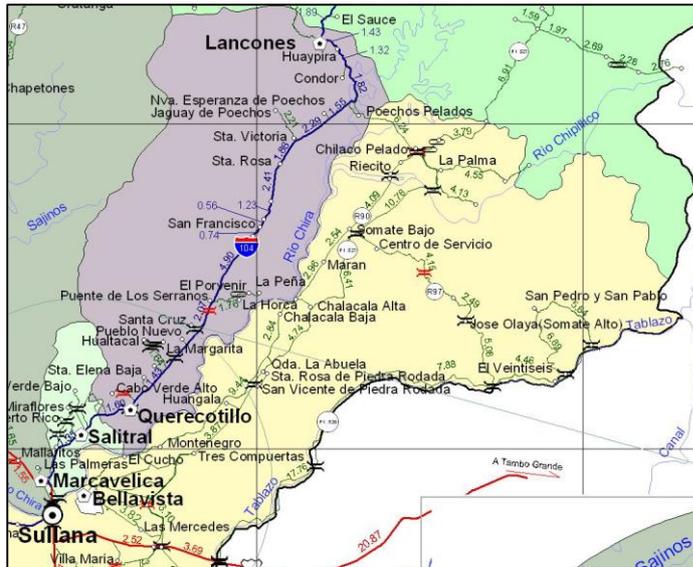


Figura 3. Ubicación del puente vehicular Riecito
Fuente: Exp. Técnico

4.2.3 Descripción y tipología estructural del puente vehicular Riecito

4.2.3.1 Descripción del puente vehicular Riecito

El puente Riecito está conformado por una luz total de 150 m entre ejes extremos, tiene 3 tramos de los cuales el central mide 70 m y los extremos 40 m de sección cajón de peralte variable pos tensada, tal como se muestra en la figura N°4 que es una vista en planta y elevación y figura N°5 que es una vista de las secciones de las vigas de peralte variable y se resume en la tabla N°3:

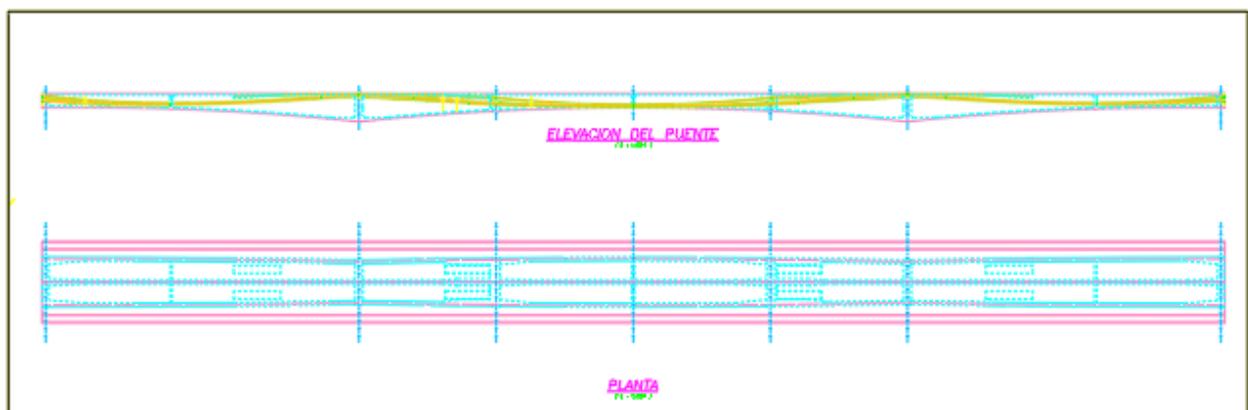


Figura 4 Vista en elevación y planta de la superestructura del puente Riecito
Fuente: Exp. Técnico

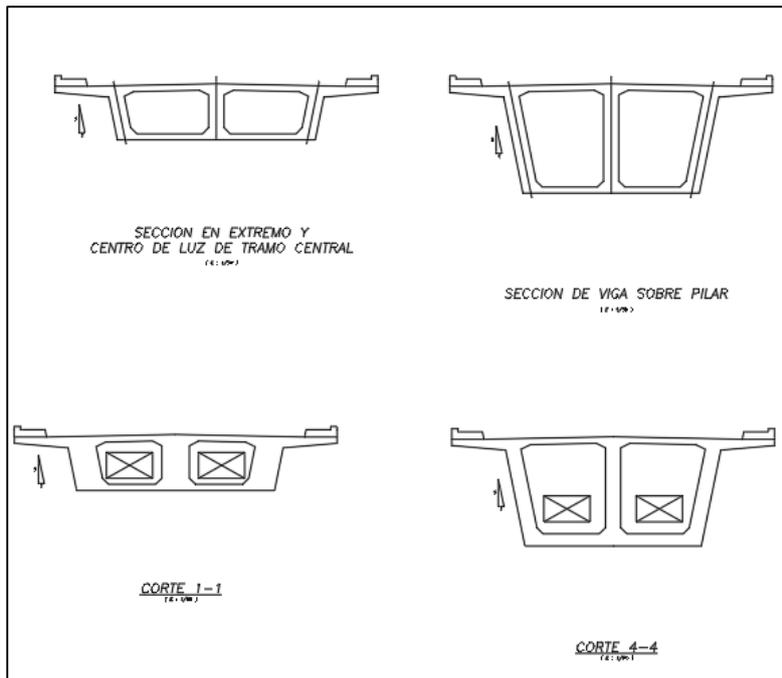


Figura 5 Sección de vigas del puente Riecito
Fuente: Exp. Técnico

A continuación, se presenta la tabla N°3, donde se resumen los datos básicos del

Puente Riecito

Tabla 3

Datos Generales del Puente Vehicular Riecito

LONGITUD TOTAL	150 m (entre ejes extremos)
NUMERO DE TRAMOS	3
LONGITUD DE TRAMOS	40 m en los tramos extremos y 70 m en el tramo central
NUMERO DE VIAS	2
ANCHO DE CALZADA	8,40 m
VEREDAS	2,10 m de ancho total entre 2 veredas de 1,05 m
ANCHO TOTAL DEL TABLERO	10,50 m
TIPO DE ESTRUCTURA	Puente continuo de peralte variable
ESTRIBOS	Concreto armado
VIGA	Tipo Cajón de 2 celdas, postensado con 3 nervios
PILARES	Concreto armado

Fuente: Propia

4.2.3.2 Tipología estructural del puente vehicular Riecito

Existen varios tipos de puente hablando estructuralmente, están los Puentes simplemente apoyados, que son estructuras apoyada en sus extremos que pueden ser de un solo o tramo o más y permiten el libre movimiento de sus extremos, están también los puentes continuos que presentan momentos flectores negativo en sus apoyos internos y positivos en el tramo central de los mismos, también están los puentes en arco, puentes reticulados, entre otros.

En el caso del puente de la presente investigación, es una estructura tipo continua de tres tramos de peralte variable, a continuación, en la Figura N°6 se muestra la elevación del puente vehicular “Riecito”

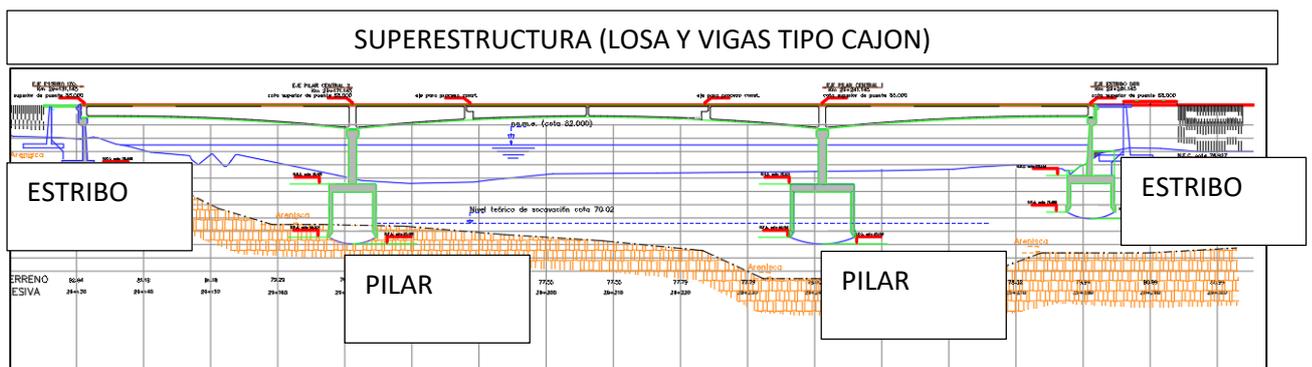


Figura 6. Elevación del puente continuo Riecito”

Fuente: Exp. Técnico

4.2.4 Material del puente vehicular “Riecito”

4.2.4.1 Concreto

Las calidades de concreto según el diseño del expediente técnico del proyecto del puente “Riecito”, se expone a continuación en la tabla N°4:

Tabla 4

Resistencia de diseño a la compresión del concreto del puente Riecito

	ELEMENTO	RESISTENCIA (KG/CM2)
SUPERESTRUCTURA	Viga	350 kg/cm2
	Pilar	280 kg/cm2
SUB ESTRUCTURA	Losa de Aproximación	210 kg/cm2

Fuente: Propia

4.2.4.2 Acero

Tabla 5

Especificaciones del acero del Puente Riecito”

Elemento	Resistencia (Kg/cm2)
Acero de Refuerzo	ASTM A615 Grado 60, fy = 4200 Kg/cm2.
Acero de Presfuerzo	ASTM A416 G 270 BR

Fuente: Propia

A continuación, se detalla en la tabla N°5 las resistencias de diseño del acero en el puente Riecito

4.2.5 Normativa

El diseño de las estructuras del proyecto del puente Riecito se realizó según bases en las partes aplicables de las siguientes Normas Técnicas y Reglamentos, teniendo en cuenta un periodo de retorno de 1000 años:

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. seventh Edition, 2012.
- AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2011.
- Manual de Diseño de Puentes. Ministerio de Transportes y Comunicaciones

4.2.6 Acciones o cargas empleadas en el diseño convencional del puente Riecito

a) Cargo de peso propio

Para el cálculo de las demandas por peso propio de los elementos de concreto fueron considerados el peso de la viga así como los diafragmas, para esto se utilizó un peso unitario $f'c = 2.40 \text{ Ton/m}^3$.

b) Cargas muertas

Están conformadas por el peso de la carpeta asfáltica (2.25 Ton/m³) y el peso de las barreras tipo New Jersey (0.45 Ton/m).

c) Cargas vivas

El análisis por carga viva ha sido realizado aplicando la carga HL93 del artículo 3.6.1.2 de la norma AASHTO LRFD la cual consiste en una combinación del camión de diseño con la carga distribuida de diseño de 9.3 N/mm. La carga viva es resistida por la sección compuesta total.

d) Carga sísmica

El análisis sísmico ha sido realizado aplicando un análisis de superposición modal espectral, para el cual se utilizó el espectro de respuesta de diseño que señala la norma AASHTO en el artículo 3.10.6.1, el cual para su elaboración utilizó un coeficiente de aceleración de 0.26 y un coeficiente de sitio 1.20 ya que se tiene un suelo del tipo II.

4.3 Puentes con aislador sísmico

Dado a que la estructura del puente vehicular Riecito está ubicado en el departamento de Piura, zona potencialmente sísmica, se encuentra expuestas fuerzas producidas por el sismo y dando como posible consecuencia daños a la misma es por ello que se recurre a usar en este caso aisladores sísmicos elastoméricos y aisladores con sistema de péndulo friccional, ambos apoyos reducen las fuerzas horizontales en la estructura gracias a la combinación de los siguientes efectos:

a) Incremento de la flexibilidad lateral entre las cimentaciones y la superestructura, lo que produce un aumento del periodo propio de vibración de la estructura y, por tanto, una reducción de la aceleración espectral y de la fuerza sísmica.

b) Disipación de energía (en forma de calor), lo que supone una reducción del espectro de respuesta y, por tanto, una reducción de la fuerza sísmica.

4.3.1 Filosofía de diseño en puentes con aisladores sísmicos en la estructura

Los aisladores sísmicos son dispositivos que se comportan flexiblemente de manera horizontal, es decir, tienen una alta rigidez vertical, ya que estos soportan el peso de la superestructura del puente y tienen una muy baja rigidez horizontal en comparación con la vertical, lo que genera que la estructura se flexibilice y aumente su periodo fundamental de vibración.

“Los aisladores sísmicos se pueden clasificar generalmente en dos categorías, aquellos que usan componentes elastoméricos y aquellos que usan componentes deslizantes”. (Buckle y Constantinou, 2006, p.5).

Según la Guía de especificaciones de diseño de puentes con aisladores sísmicos emitida por el AASHTO (GSID 2014) indica como ya se mencionó anteriormente que la intención del sistema de aislamiento sísmico en la estructura, es aumentar el periodo fundamental de vibración de modo que el puente esté sometida a menores fuerzas sísmicas, y así no generar daños en la estructura a diferencia de un diseño convencional.

a) Flexibilidad

En la Figura N° 7, se muestra el comportamiento de la estructura cuando el periodo aumenta (Flexibilidad) la aceleración disminuye, es decir el periodo se comporta de manera inversamente proporcional a las cortantes en la estructura

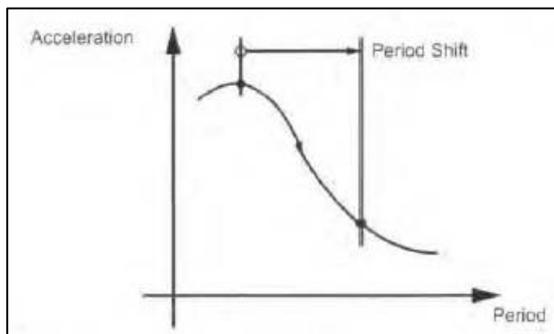


Figura 7 Curva de Respuesta de Aceleración
Fuente: GSID, 2014

Sin embargo, al producirse este comportamiento en que el periodo aumenta, los desplazamientos del aislador flexible, aumentan también, es decir el periodo fundamental de vibración es directamente proporcional a los desplazamientos del aislador tal como se muestra en la figura N°8 presentada a continuación:

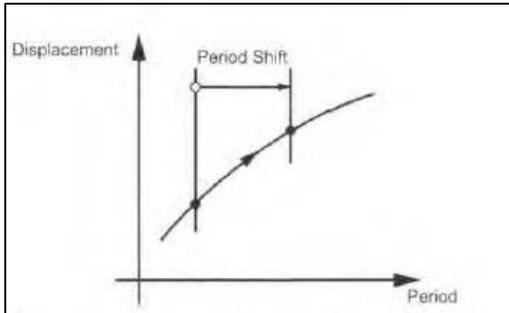


Figura 8. Curva de Respuesta de Desplazamientos

Fuente: GSID, 2014

b) Disipador de energía

Según el GSID los desplazamientos relativos se pueden controlar, si la amortiguación adicional es introducida en la estructura a nivel del aislamiento, dando una curva de respuesta como la que se representa en la figura N° 9 presentada a continuación

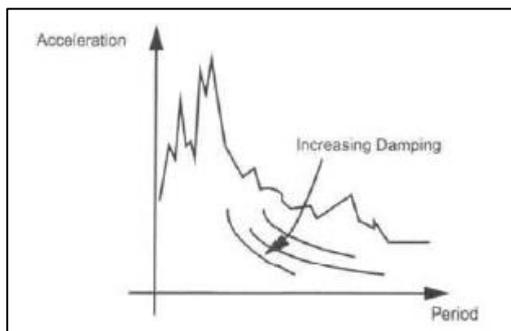


Figura 9. Espectro de Respuesta de Aceleración

Fuente: GSID, 2014

Dando un espectro de respuesta de desplazamiento presentada en la Figura N° 10 a continuación, donde denota que, al incrementar el amortiguamiento, los desplazamientos se pueden reducir a medida que el periodo aumenta.

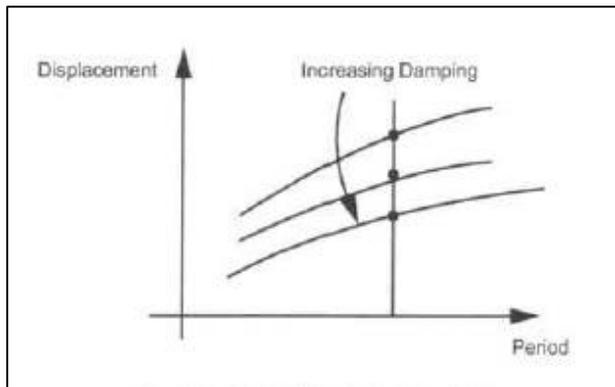


Figura 10. Espectro de Respuesta de Desplazamiento
Fuente: GSID, 2014

En la Figura N° 11 se muestra un cuadro de histéresis de fuerza de desplazamiento idealizada a medida que la fuerza aumenta, en el que el área sombreada es la medida de la energía disipada durante un ciclo de movimiento

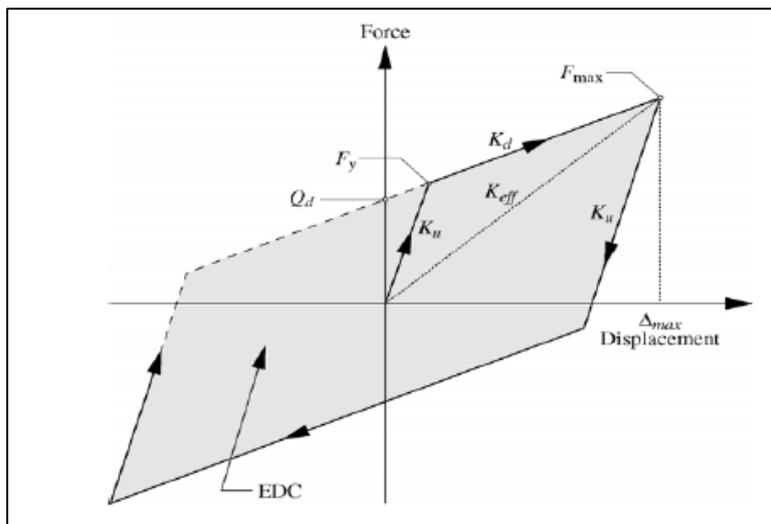


Figura 11. Cuadro de histéresis con sistema de aislamiento
Fuente: GSID, 2014

Donde:

Q_d = Resistencia característica (Fuerza en desplazamiento cero)

F_y = Fuerza de Fluencia

F_{max} = Fuerza máxima

K_d = Rigidez post-elástica

K_u = Rigidez elástica (descarga)

K_{eff} = Rigidez efectiva

Δ_{max} = Desplazamiento máximo del apoyo

EDC = Energía disipada por ciclo

Cuando a la estructura se le implemente el sistema de aislamiento sísmico, tiende a comportarse como la línea continua en la figura N°12, como se puede observar cuando se le aplica el amortiguamiento a la estructura, tiende a reducir la aceleración espectral de A2 a A3, siendo las aceleraciones con las que se usan para determinar las fuerzas de diseño A1 para puentes convencionales y A3 para puentes aislados.

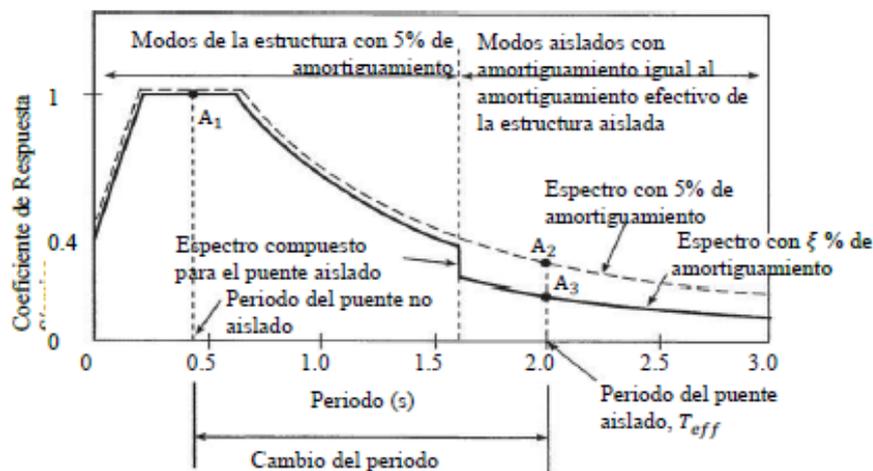


Figura 12. Espectro de respuesta de diseño con puentes con sistema de aislamiento GSID, 2014

4.3.2 Procedimiento de análisis

Para el análisis sísmico de los puentes se pueden utilizar uno o más de los siguientes procedimientos:

- Método Simplificado:
- Método Unimodal Espectral
- Método Multimodal Espectral
- Método Tiempo Historia

La publicación AASHTO LRFD, indica que análisis debe considerarse, según la geometría del puente, el número de tramos, la zona sísmica según esté ubicado el proyecto, y la clasificación del mismo.

En el manual de puentes del Perú indica que existen 3 tipos de puente para su clasificación según los fines de diseño a continuación:

a) Puentes críticos: “Son aquellos puentes que deben permanecer abiertos para el tránsito de todo tipo de vehículos después del sismo de diseño y deben poder ser utilizados por vehículos de emergencia para propósitos de seguridad y/o defensa inmediatamente después de un gran sismo, por ejemplo, un evento de periodo de retorno de 2500 años” (Manual de Puentes del MTC,2016)

b) Puentes esenciales: “Son aquellos puentes que deberían, como mínimo, estar abiertos para vehículos de emergencia o para fines de seguridad y/o defensa inmediatamente después del sismo de diseño, con un periodo de retorno de 1000 años” (Manual de Puentes del MTC,2016)

c) Otros puentes: Cuando no son críticos ni esenciales.

En el caso del puente Riecito, la clasificación según el diseño considerado es, puente esencial.

En la investigación publicada por el Ing. Manuel Lincoln, es presentada una tabla según los requisitos mínimos para considerar el análisis sísmico basado en el AASHTO LRFD, presentada a continuación:

Tabla 6

Requisitos de análisis mínimos para efectos sísmicos

Zona sísmica	Puentes de un solo tramo	Puentes de múltiples tramos					
		Otros puentes		Puentes esenciales		Puentes críticos	
		Regular	Irregular	Regular	Irregular	Regular	Irregular
1	No requiere análisis sísmico	*	*	*	*	*	*
2		SM/UL	SM	SM	MM	MM	MM
3		SM/UL	MM	MM	MM	MM	TH
4		SM/UL	MM	MM	MM	TH	TH

Fuente: "AASHTO LRFD"

Donde:

UL= Método Elástico de Carga Uniforme

SM = Método elástico Unimodal

MM = Método elástico multimodal

TH= Método tiempo Historia

Por tanto, en nuestro caso, con el puente Riecito realizaremos un análisis multimodal y simplificado

4.3.3 Análisis Sísmico

Para el análisis Sísmico y creación del espectro de diseño se usan los parámetros según la ubicación del puente.

4.3.3.1 Peligro Sísmico

a) Aceleración espectral según la ubicación del Puente

Se obtienen los valores del mapa de isoaceleraciones presentada en el Manual del puente:

a.1) PGA (Aceleración espectral en periodo estructural 0.0 s)

a.2) S1 (Aceleración espectral en periodo estructural 0.2s)

a.3) Ss (Aceleración espectral en periodo estructural 1.0 s)

b) Clasificación de sitio

Se define la clase de Sitio según los datos arrojados en el estudio geofísico del Proyecto o Suelos y éste después es ubicado en la tabla N°7 presentada a continuación:

Tabla 7

Definición de Clase de Sitio” Fuente: Manual de puentes del MTC

Tabla 2.4.3.11.2.1.1-1 Definición Clase de Sitio (Tabla 3.10.3.1-1 AASHTO)

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

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

Donde:

\bar{V}_s = promedio de la velocidad de onda de corte para perfiles de suelo superiores a los 100 ft.

\bar{N} = promedio de la cantidad de golpes (golpes/ft) de la prueba SPT (ASTM D1586) para perfiles de suelo superiores a 100 ft

\bar{S}_u = promedio de resistencia al corte no drenado en ksf (ASTM D2166 o ASTM D2850) para perfiles de suelos superiores a 100 ft

c) Factores de Sitio

Para obtener los factores de sitio, se recurre a las tablas expuestas en el manual de puentes del MTC según los parámetros hallados previamente y según la clase de Sitio

c.1) Fpga (Factor de sitio en periodo cero en el espectro de aceleración), este dato se obtiene de la siguiente Tabla N°8

Tabla 8

Valores de Factor de Sitio F_{pga}

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-1
Valores de Factor de Sitio, F_{pga} En Periodo-Cero en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-1 AASHTO)

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

Notas:

1. Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de PGA.
2. Llevar a cabo investigaciones geotécnicas específicas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

Fuente: Manual de puentes del MTC

c.2) F_a (Factor de sitio para rango de periodo corto en el espectro de aceleración), este dato se obtiene de la siguiente Tabla N°9

Tabla 9

Valores de Factor de Sitio F_a

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-2
Valores de Factor de Sitio, F_a , Para rango de Periodo Corto en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-2 AASHTO)

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

Notas:

1. Usar la interpolación lineal para valores intermedios de S_s .
2. Llevar a cabo investigaciones geotécnicas específicas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

Fuente: Manual de puentes del MTC

c.2) F_v (Factor de sitio para rango de periodo largo en el espectro de aceleración), este dato se obtiene de la siguiente Tabla N°10

Tabla 10

Valores de Factor de Sitio F_v Fuente: Manual de puentes del MTC

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-3
Valores de Factor de Sitio, F_v , Para rango de Periodo Largo en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-3 AASHTO)

Clase de Sitio	Coeficiente Aceleración Espectral en Periodo 1.0 sec (S_1) ¹				
	$S_1 < 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 > 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.8	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	*	*	*	*	*

Notas:

1. Usar la interpolación lineal para valores intermedios de S_1 .
2. Llevar a cabo investigaciones geotecnicas específicas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

4.3.3.2 Diseño de espectro de Respuesta

Para la construcción del gráfico de diseño de espectro de respuesta, es necesario realizar unos cálculos con los parámetros hallados anteriormente, usando las siguientes formulas:

$$A_s = F_{pga}PGA \quad \text{Ecuación 2}$$

$$S_{Ds} = F_a S_s \quad \text{Ecuación 3}$$

$$S_{D1} = F_v S_1 \quad \text{Ecuación 4}$$

Una Vez hallado estos valores se procede a tener en cuenta estas condiciones para la construcción del espectro

Si :

$$T < T_o, \text{ entonces } C = (S_{Ds} - A_s) \times T / T_o + A_s \quad \text{Ecuación 5}$$

$$T_o < T < T_s, \text{ entonces } C = S_{Ds} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$T > T_s, \text{ entonces } C = S_{Ds} / T_o \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$$T_o = 0.2 S_{D1} / S_{Ds} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$T_s = S_{D1} / S_{Ds} \quad \text{Ecuación 9}$$

Obteniendo estas condiciones, colocamos en el gráfico T vs C

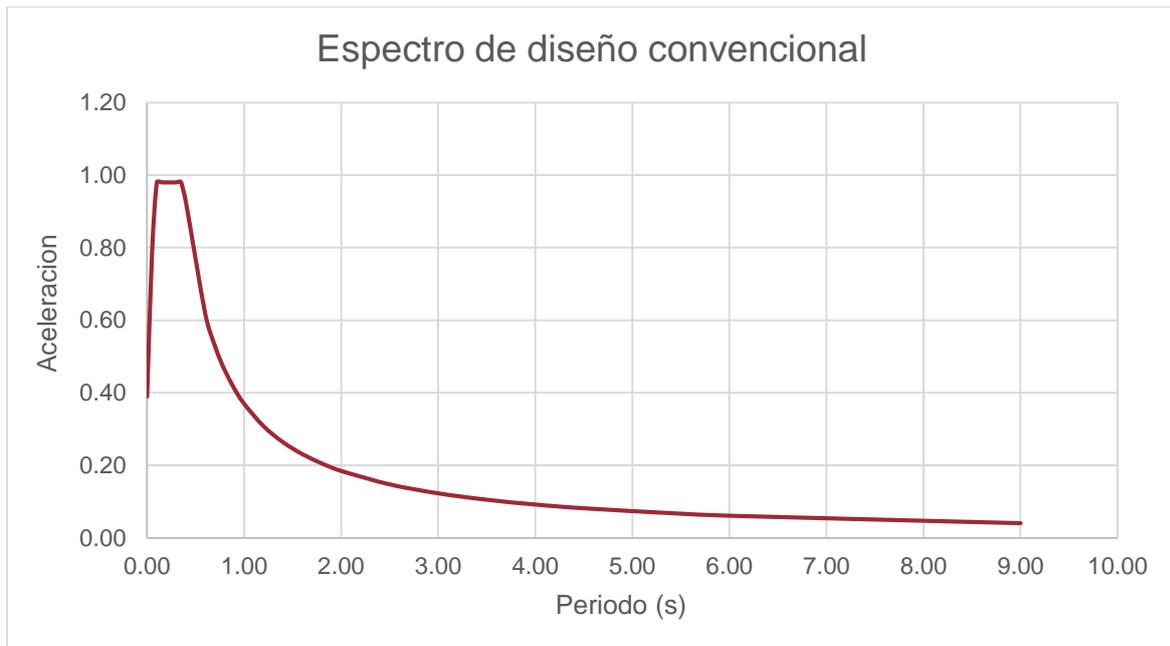


Figura 13. Espectro de respuesta de diseño convencional
Fuente: Propia

4.3.4 Método Simplificado

a) Desplazamiento inicial del sistema y propiedades

Desplazamiento:

Según la Guía de especificaciones de Diseño de AASHTO nos indica un desplazamiento inicial con la siguiente fórmula:

$$d = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \left(\frac{S_{D1} T_{eff}}{B_L}\right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

g: aceleración de la gravedad

T_{eff} : Periodo efectivo

B_L : Coeficiente de amortiguamiento para rango de periodo largo de espectro de diseño de respuesta

S_{D1} : Coeficiente de aceleración de respuesta espectral horizontal en periodo de 1.0 s, modificada por el factor de sitio de periodo largo

Sin embargo, en los ejemplos de aplicaciones de aisladores en puentes convencionales, se sugiere un desplazamiento inicial de 10 el Valor de S_{D1} ; por tanto el valor inicial de desplazamiento será denotada por la siguiente fórmula:

$$d = 10 \times S_{D1}$$

Resistencia Característica de la unidad de aislador:

Q_d : Resistencia característica de la unidad de aislador, es la ordenada del gráfico de histéresis como se aprecia en la Figura N°11 cuando el desplazamiento del aislador es cero, para hallar este valor el GSDI de AASHTO, donde denota que es el 5% de la superestructura, planteando la siguiente ecuación:

$$Q_d = 0.05 \times W_{ss} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

W_{ss} : Peso de la superestructura incluyendo cargas permanentes

Segunda Rigidez pendiente de la curva de Histéresis Bilineal:

K_d : Segunda rigidez pendiente de la curva bilineal se calcula según el GSID de AASHTO como el 5% de la relación entre el peso de la superestructura y el desplazamiento, planteando la siguiente ecuación:

$$K_d = 0.05 \times (W/d) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

W : Peso de la superestructura incluyendo cargas permanentes

d : Desplazamiento inicial considerado

a) Propiedades iniciales del aislador en cada apoyo

Hallando con la ayuda del programa CSI Bridge, obtenemos los pesos en cada apoyo para así poder calcular la Carga o fuerza y rigidez del aislador por apoyo, obteniendo las siguientes formulas respectivamente

$$Q_{d,j} = Q_d \left(\frac{W_j}{W} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Kd, j = Kd \left(\frac{Wj}{W} \right)$$

Ecuación 14

Donde:

Wj: Peso de la superestructura en cada apoyo

Qd,j: Carga o fuerza por apoyo

Kd,j: Valor rigidez por apoyo

Rigidez efectiva combinada de apoyo con aislamiento sísmico

Primero se halla el valor de la rigidez de la sub estructura, en este caso los pilares y estribos, para poder calcular el valor α que nos servirá para hallar la rigidez efectiva, obteniendo estas dos fórmulas:

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

Ecuación 15

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

Ecuación 16

Donde:

$K_{sub,j}$: Rigidez de la sub estructura por apoyo

Rigidez total efectiva

Sería la sumatoria de las rigideces halladas por apoyo:

$$K_{eff} = \sum_{j=1}^m K_{eff,j}$$

Ecuación 17

Donde:

$K_{eff,j}$: Rigidez efectiva por apoyo

a) Desplazamiento de aisladores sísmicos por apoyo

Se calcula el desplazamiento con aislamiento sísmico por apoyo con la siguiente ecuación.

$$d_{isol,j} = \frac{d}{1 + \alpha_j}$$

Ecuación 18

Donde:

$d_{isol,j}$; Desplazamiento de aislador por apoyo

Rigidez de aisladores sísmicos por apoyo

Se calcula el desplazamiento con aislamiento sísmico por apoyo con la siguiente ecuación:

$$K_{isol,j} = \frac{Q_{d,j}}{d_{isol,j}} + K_{d,j} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$K_{isol,j}$; Rigidez de aislador por apoyo

Carga lateral en cada elemento subestructura

Se halla la carga lateral por elemento en la subestructura con la siguiente ecuación

$$F_{sub,j} = K_{sub,j} d_{sub,j} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$F_{sub,j}$; Fuerza lateral en la subestructura por elemento

$K_{sub,j}$; Rigidez de la subestructura por elemento

$d_{sub,j}$; Desplazamiento en la subestructura por elemento

Fuerza cortante de la columna por apoyo

Se halla con la siguiente ecuación

$$F_{col,j,k} = \frac{F_{sub,j}}{\# \text{ of columns at support } j} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

$F_{sub,j}$; Fuerza lateral en la subestructura por elemento

Periodo Efectivo y Ratio de amortiguamiento

El periodo efectivo se calcula obteniendo los datos del Peso efectivo, y Rigidez efectivo previamente, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 22} \quad T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W_{eff}}{gK_{eff}}}$$

Donde:

W_{eff} ; Peso efectivo de la superestructura

T_{eff} : Periodo efectivo de la superestructura

K_{eff} : Rigidez efectiva

Seguidamente hacemos uso de la siguiente ecuación para calcular el amortiguamiento:

$$\xi = \frac{2 \sum_j (Q_{d,j} (d_{isol,j} - 0))}{\pi \sum_j (K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2)} = \quad \text{Ecuación 23}$$

g) Factor de amortiguamiento

Una vez hallado los valores, calculamos el factor de amortiguamiento según las siguientes condiciones expresadas en la GSID:

$$B_L = \begin{cases} \left(\frac{\xi}{0.05}\right)^{0.3}, & \xi < 0.3 \\ 1.7, & \xi \geq 0.3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

B_L : Factor de amortiguamiento

Esta serie de pasos es iterativa, hasta lograr la convergencia en los desplazamientos arrojados.

4.3.5 Método Multimodal Espectral

Para el método multimodal espectral se ha realizado lo siguiente:

Cargas y Rigidez de aisladores

Teniendo los resultados de Qd y Kd previamente, se divide entre el número de aisladores para obtener los valores mencionados por aislador:

Para las cargas:

$$Q_{d,i} = \frac{Q_{d,j}}{n} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

$Q_{d,i}$: Carga de aislador por apoyo

$Q_{d,j}$: Carga en cada apoyo

n : Numero de aisladores por apoyo

Para las rigideces:

$$K_{d,i} = \frac{K_{d,j}}{n} \quad \text{Ecuación 26}$$

$K_{d,i}$: Rigidez de aislador por apoyo

$K_{d,j}$: Rigidez en cada apoyo

n : Numero de aisladores por apoyo

a) Rigidez inicial y desplazamiento fluido

$$K_{u,i} = 10K_{d,i} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$d_{y,i} = \frac{Q_{d,i}}{K_{u,i} - K_{d,i}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

$Q_{d,i}$: Carga por aislador

$K_{d,i}$: Rigidez por aislador

Rigidez efectiva del aislador

Este valor de la rigidez de aislador (K_{isol}) se obtiene dividiendo el ultimo valor obtenido en el método simplificado entre el número de aisladores por apoyo

Se procedió a insertar estas rigideces de los aisladores al modelamiento del puente, y se insertó el nuevo espectro con el aislador sísmico que se explica a continuación, se obtienen los desplazamientos, y se itera en el CSI Bridge de modo que se obtenga la convergencia en los desplazamientos

4.3.5.1 Espectro de Respuesta con aislador sísmico

Para la creación del gráfico del espectro de respuesta, se toma el siguiente criterio respetando las siguientes condiciones:

Si:

$$T > 0.8xT_{eff} \text{ entonces } C = C_1/B_L \quad \text{Ecuación 29}$$

$$T < 0.8xT_{eff} \text{ entonces } C = C_1 \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

C_1 : Coeficiente de espectro de sistema convencional (Ver Art. 4.3.3.2)

C : Coeficiente de espectro con aislamiento sísmico

T_{eff} : Periodo efectivo

Realizando las condiciones expuestas obtenemos el siguiente gráfico (Ver figura N°14) de espectro del comportamiento de la estructura con sistema de aislamiento sísmico.

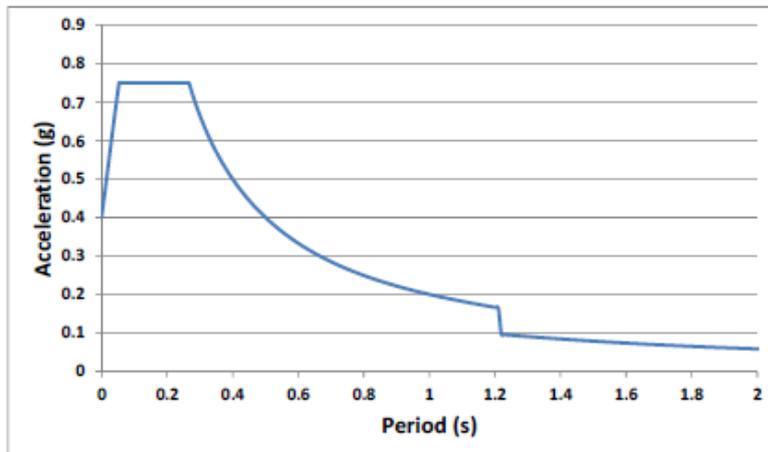


Figura 14 Espectro de respuesta con aislamiento sísmico
Fuente: GSID,2014

4.3.6 Aisladores Sísmicos

4.3.6.1 Aisladores con núcleo de plomo

Un aislador LRB, es un elastómero que contiene núcleo de plomo insertado de forma vertical en su línea central. Cuando el rodamiento y el núcleo de plomo están deformados en corte, la rigidez elástica del plomo proporciona la rigidez inicial denominada K_u

Debemos tener en cuenta que, al diseñar las dimensiones físicas del rodamiento, como se muestra en la Figura N°15 (B, dL) deben redondearse hasta el siguiente incremento de 1/4", mientras que el grosor total del elastómero, T_r , se especifica en múltiplos de la capa grosor. Los espesores de capa típicos para rodamientos con núcleos de plomo son 1/4" y 3/8". El caucho natural de alta calidad debe especificarse para el elastómero. Debe tener un módulo

de corte en el rango de 60-120 psi y un máximo alargamiento a la rotura superior a 5,5.

(GSID,2014)

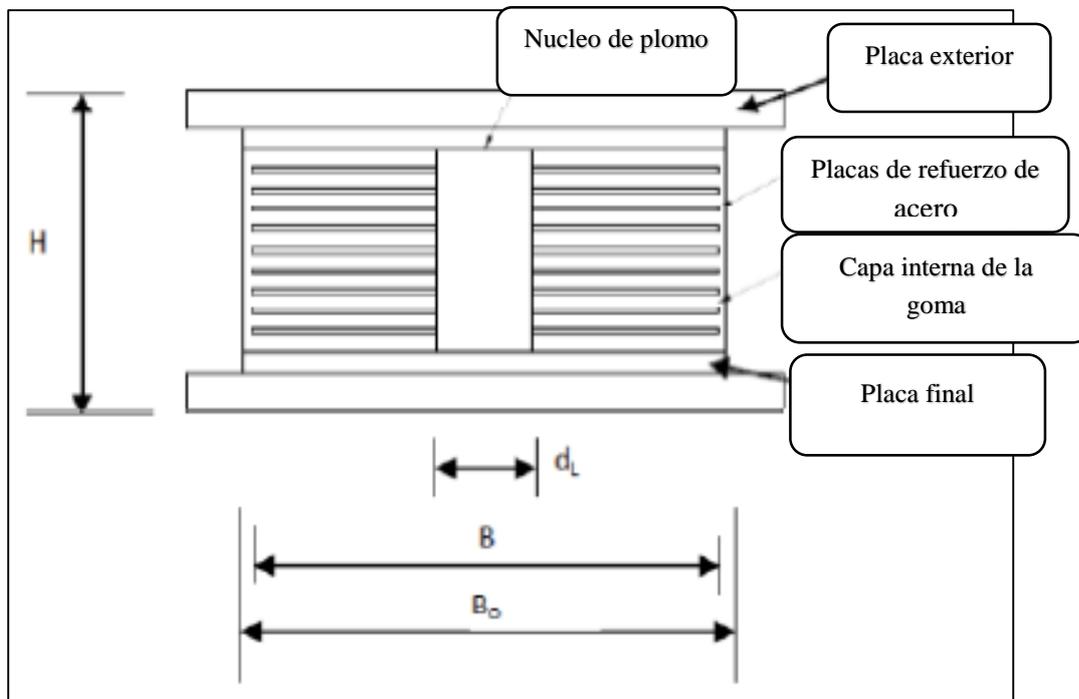


Figura 15. Componentes principales de un aislador de núcleo de plomo

Fuente: GSID,2014

Características iniciales

- Resistencia característica requerida, Q_d de cada aislador
- Rigidez post-elástica requerida, K_d de cada aislador
- El desplazamiento total de diseño, d_t , para cada aislador
- Carga muerta máxima aplicada, PDL
- Carga viva máxima, PLL
- Carga de viento máxima, PWL

Luego con todos esos parámetros obtenidos del modelamiento del puente en el CSI

Bridge podemos empezar a calcular las dimensiones del aislador

En la figura N°16 presentada a continuación podemos apreciar el cuadro de histéresis producido en una estructura con aislamiento (LRB)

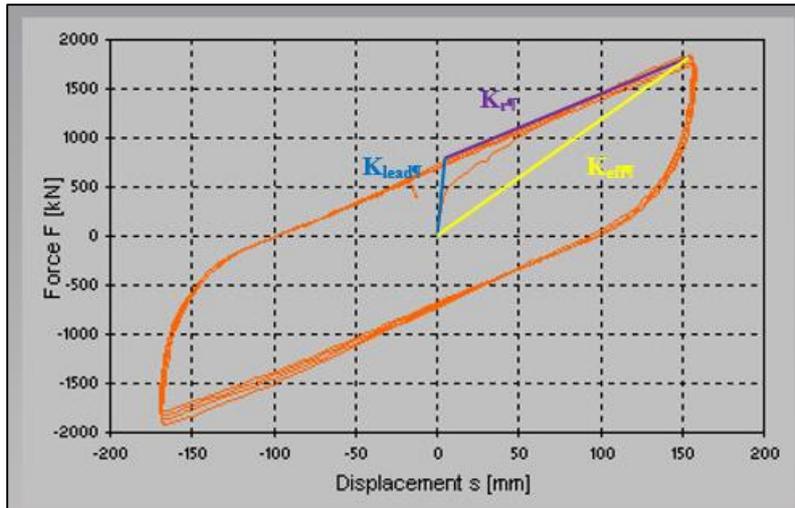


Figura 16. Cuadro de histéresis de un apoyo con núcleo de plomo

Dónde: K_{lead} = rigidez horizontal del núcleo de plomo

K_r = rigidez horizontal del elastómero

K_{eff} = rigidez horizontal eficaz del apoyo para su deformación
máxima

4.3.6.1.1. Dimensiones del aislador

A continuación, se detallará el diseño del aislador con núcleo de plomo según la guía de especificaciones de diseño de aislamiento sísmico de AASHTO (GSID)

a) Diámetro del núcleo de plomo

Determinamos el diámetro requerido del núcleo de plomo, d_L , usando:

$$d_L = \sqrt{\frac{Q_d}{0.9}}$$

Ecuación 31

Donde:

Q_d = Resistencia característica del aislador

d_L = Diámetro del núcleo de plomo

b) Área de contacto y diámetro del aislador

La Guía de especificaciones para diseño de aisladores sísmicos (GSID) no nos impone límites al esfuerzo de compresión, (se utilizan criterios de deformación) es útil comenzar el dimensionamiento asumiendo una tensión permisible, digamos, 1.0 ksi.

$$A_b = \frac{P_{DL} + P_{LL}}{1.0} \text{ in}^2 \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

PDL = Carga viva

PLL = Carga Muerta

y el diámetro unido correspondiente (teniendo en cuenta el orificio requerido para acomodar el núcleo de plomo) viene dado por

$$B = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi} + d_L^2} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

dL = Carga viva

B = Diámetro del aislador

Ab = Área del plano

Al realizar la operación redondeamos el diámetro calculado, B, a 1/4 más cercano de pulgada y recalculamos el área real usando la siguiente ecuación:

$$A_{b=} = \frac{\pi}{4} (B^2 - d_L^2) \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

dL = Carga viva

B = Diámetro del aislador (redondeado a 1/4 más cercano de pulgada)

Ab = Nueva área de plano

Debemos tener en cuenta que el diámetro total es igual al diámetro más el grosor de las capas de la cubierta lateral (generalmente 1/2 pulgada a cada lado). En este caso, el diámetro general, B_o viene dado por la siguiente ecuación:

$$B_o = B + 2 (0.5) \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

B = Diámetro del aislador (redondeado a $\frac{1}{4}$ más cercano de pulgada)

B_o = Diámetro total del aislador

c) Espesor de elastomérico y numero de capas

La rigidez al corte del rodamiento elastómero está dada por:

$$T_r = \frac{GA_b}{K_d} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

G = Modulo de corte del caucho

T_r = Espesor total del elastómero

K_d = Rigidez al corte

El número de capas lo determinamos usando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{T_r}{0.25} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

T_r = Espesor total del elastómero

n = Numero de capas

d) Altura total

La altura total del aislador, H , lo obtenemos usando:

$$H = nt_r + (n - 1)t_s + 2t_c \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

n = Numero de capas

t_s = espesor de una cuña interna (generalmente aproximadamente 1/8 pulg.)

t_c = espesor combinado de la placa de la cubierta final (0.5 in) y placa exterior (1.0 in)

e) Comprobación de medidas

El rango recomendado para el diámetro es de acuerdo a los siguientes parámetros:

$$\frac{B}{3} \geq d_L \geq \frac{B}{6} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$K_{d,\min} = \frac{0.025 W}{d} > K_d = \frac{GA_b}{T_r} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

G = Modulo de corte del caucho

T_r = Espesor total del elastómero

K_d = Rigidez al corte

W = Peso de la carga muerta

4.3.6.1.2 Verificaciones

a) Verificaciones del límite de deformación

De acuerdo al artículo 14.2 y 14.3 de la Guía de especificaciones de diseño con aislamiento Sísmico (GSID)

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r \leq 5.5 \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

γ_c = Máximo esfuerzo cortante en la capa debido a la compresión.

$\gamma_{s,eq}$ = Tensión de corte debido a las cargas sísmicas.

γ_r = Tensión de corte debido a la rotación.

b) Verificaciones de estabilidad de carga vertical

b.1) Estabilidad de carga vertical en estado no deformado

a) La capacidad de carga crítica de un aislador elastomérico en el desplazamiento de corte cero está dado por:

$$\frac{P_{cr(\Delta=0)}}{P_{DL} + P_{LL}} \geq 3 \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

PDL = Carga Muerta

PLL = Carga viva

b.1) Estabilidad de carga vertical en estado deformado

La capacidad de carga crítica de un aislador elastomérico en el desplazamiento de corte Δ puede ser aproximado por:

$$\frac{P_{cr(\Delta)}}{1.2P_{DL} + P_{SL}} \geq 1 \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde:

P_{DL} = Carga Muerta

P_{LL} = Carga viva

Debemos tener en cuenta que estas dos últimas condiciones de verificación de carga vertical en estado deformado y no deformado tienen que cumplir para poder seguir avanzando con el diseño del aislador de núcleo de plomo; si no cumple con estas dos condiciones se tiene que volver a rediseñar y repetir todos los pasos mencionados anteriormente.

4.3.6.1.3 Control de Desempeño mínimo y máximo

Es necesario que el desempeño de cualquier sistema de aislamiento, se verifique usando valores máximos y mínimos de rigidez efectiva del sistema. Estos valores son calculados de los valores mínimos y máximos de K_d y Q_d respectivamente que se encuentran usando modificación de propiedades del sistema, λ , como se indica en la tabla N°11 a continuación del GSID AASHTO

Tabla 11

Valores mínimos y máximos de K_d y Q_d

Eq. 8.1.2-1 GSID	$K_{d,max} = K_d \lambda_{max,Kd}$
Eq. 8.1.2-2 GSID	$K_{d,min} = K_d \lambda_{min,Kd}$
Eq. 8.1.2-3 GSID	$Q_{d,max} = Q_d \lambda_{max,Qd}$
Eq. 8.1.2-4 GSID	$Q_{d,min} = Q_d \lambda_{min,Qd}$

Fuente: GSID, 2014

Para determinar los factores modificados de propiedades del sistema, según la guía de especificaciones de diseños, se debe considerar incluir los efecto de temperatura, edad, velocidad, contaminación entre otros, para ellos se usa la tabla N°12, los valores numéricos para estos factores se pueden obtener del Apéndice A de la Guía de especificaciones de Diseño de AASHTO (Ver anexo)

Tabla 12

Valores máximos y mínimos para los factores de modificación del sistema

Eq. 8.2.1-1 GSID	$\lambda_{min,Kd} = (\lambda_{min,t,Kd}) (\lambda_{min,a,Kd})$ $(\lambda_{min,v,Kd}) (\lambda_{min,tr,Kd}) (\lambda_{min,c,Kd})$ $(\lambda_{min,scrag,Kd})$
Eq. 8.2.1-2 GSID	$\lambda_{max,Kd} = (\lambda_{max,t,Kd}) (\lambda_{max,a,Kd})$ $(\lambda_{max,v,Kd}) (\lambda_{max,tr,Kd}) (\lambda_{max,c,Kd})$ $(\lambda_{max,scrag,Kd})$
Eq. 8.2.1-3 GSID	$\lambda_{min,Qd} = (\lambda_{min,t,Qd}) (\lambda_{min,a,Qd})$ $(\lambda_{min,v,Qd}) (\lambda_{min,tr,Qd}) (\lambda_{min,c,Qd})$ $(\lambda_{min,scrag,Qd})$
Eq. 8.2.1-4	$\lambda_{max,Qd} = (\lambda_{max,t,Qd}) (\lambda_{max,a,Qd})$ $(\lambda_{max,v,Qd}) (\lambda_{max,tr,Qd}) (\lambda_{max,c,Qd})$

Fuente: GSID (2014)

Los factores de ajuste se aplican a factores individuales (excepto λ_v) para tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de todos los máximos (o todos los mínimos) al mismo tiempo. Estos factores son aplicados a todos los factores λ que se desvían de la unidad, pero solo a la que la unidad Arte. 8.2.2 GSID da estos factores como sigue:

1.00 para puentes críticos

0,75 para puentes esenciales

0.66 para todos los demás puentes

4.3.6.1.4 *Resumen del rendimiento del puente*

- Máximo desplazamiento de la superestructura (longitudinal y transversal)
- Máximo desplazamiento de la superestructura (Resultante)
- Corte de columna máximo (resultante)
- Momento máximo de columna (sobre transversal eje)
- Momento máximo de columna (aproximadamente eje longitudinal)
- Máximo torque de la columna

4.3.6.2 Aisladores con sistema de péndulo friccional

El aislador con sistema de péndulo friccional (FPS) a diferencia del aislador con núcleo de plomo, funciona con un control deslizante que permite la rotación en toda su concavidad.

Este dispositivo puede ser diseñado para tener largos periodos de vibración según el GSID de 5 segundos o más y son capaces de transportar cargas axiales muy grandes.

En la figura N°17, podemos ver los principales componentes que tiene este tipo de dispositivo para aislamiento sísmico, consta de una placa esférica de acero inoxidable, un deslizante articulado y una placa de carcasa, la placa esférica está de manera cóncava hacia abajo, pero también se pueden instalar con la superficie cóncava hacia arriba como lo está en la figura N°17, y el deslizador de acero inoxidable tiene contacto directo con ésta área la superficie esférica de la misma está compuesta de material de baja fricción.

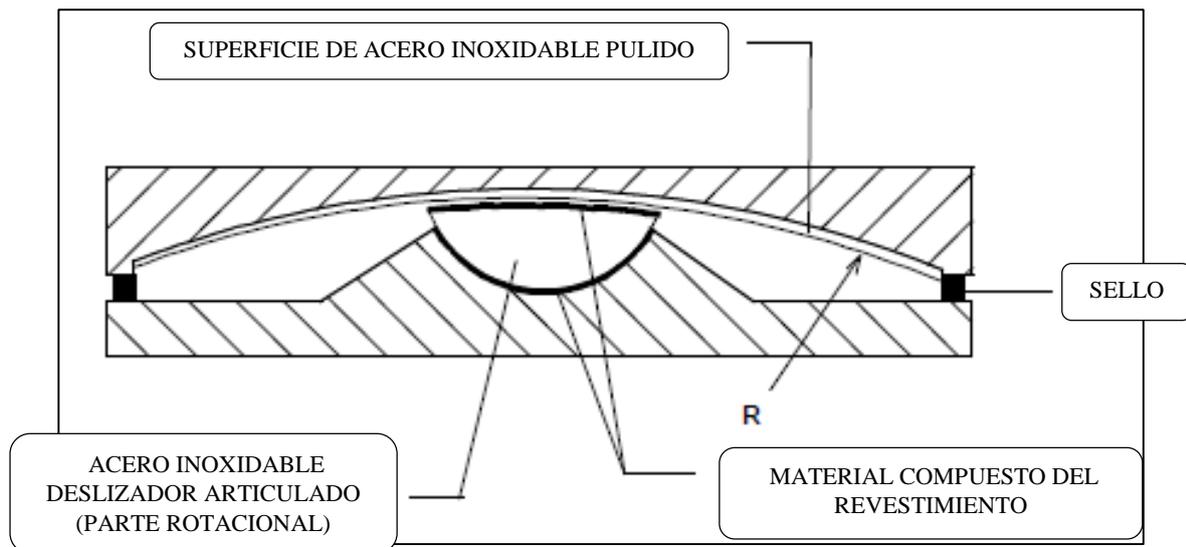


Figura 17. Componentes principales de un aislador FPS
Fuente: Ian Buckle (2011), GSID (2014)

Los rodamientos de fricción esféricos se describen con la misma ecuación de movimiento como péndulo convencional. Como consecuencia su período de vibración es directamente proporcional al radio de curvatura de la superficie cóncava. Ver la figura N°1. Por lo tanto, los cambios de período son posibles con superficies que tienen grandes radios de curvatura. Fricción entre el deslizador articulado y la superficie cóncava disipa energía y el peso del puente actúa como una fuerza restauradora, debido a la curvatura del deslizamiento superficie (GSID, 2014)

Los valores de Q_d y K_d determinan el coeficiente de fricción en la interfaz deslizante y el radio de curvatura.

Debemos tener en cuenta que el procedimiento dado en este paso está destinado solo para el diseño preliminar. Detalles de diseño final y la selección del material debe verificarse con el fabricante.

Características iniciales

- a) Resistencia característica requerida, Q_d de cada aislador
- b) Rigidez post-elástica requerida, K_d de cada aislador

- c) El desplazamiento total de diseño, d_t , para cada aislador
- d) Carga muerta máxima aplicada, PDL
- e) Carga viva máxima, PLL
- f) Carga de viento máxima, PWL
- g) Luego con todos esos parámetros obtenidos del modelamiento del puente en el CSI Bridge podemos empezar a calcular las dimensiones del aislador

4.3.6.2.1 Dimensionamiento

- a) Radio de curvatura

Determinamos el radio de curvatura requerido, R , usando:

$$R = \frac{P_{DL}}{K_d} \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

P_{DL} = Carga muerta

K_d = Rigidez Post Elástica del aislador

- b) Coeficiente de fricción

Determinamos el coeficiente de fricción requerido, μ , usando:

$$\mu = \frac{Q_d}{P_{DL}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde:

Q_d = Resistencia característica del aislador

P_{DL} = Carga Muerta

- c) Selección de material

De acuerdo al coeficiente de fricción requerido, seleccionamos un compuesto de PTFE apropiado y presión de contacto, σ_c , de la tabla N°13 presentada en la guía de especificaciones de diseño con aislamiento sísmico de AASHTO

Tabla 13

Propiedades de Material

PTFE Compound (Filled and Unfilled Teflon)	Contact Pressure, σ_c (psi)	μ (%)
Unfilled (UF)	1,000	11.93
	2,000	8.70
	3,000	7.03
	6,500	5.72
Glass-filled 15% by weight (15GF)	1,000	14.61
	2,000	10.08
	3,000	8.49
	6,500	5.27
Glass-filled 25% by weight (25GF)	1,000	13.20
	2,000	11.20
	3,000	9.60
	6,500	5.89

Fuente: GSID (2014)

d) Diámetros de disco

d.1) Area de contacto requerida, A_c

$$A_c = \frac{P_{DL}}{\sigma_c} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

P_{DL} = Carga muerta

σ_c = Presión de contacto

d.1) Determinamos el diámetro del disco, d , usando:

$$d_d = \sqrt{\frac{4 A_c}{\pi}} \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde:

A_c = Área de contacto

d_d = Diámetro del disco

f) Diámetro del aislador

Determinamos el diámetro requerido de la superficie cóncava, L_{chord} , usando

$$L_{chord} = 2 \left(\Delta + \frac{d_d}{2} \right) \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

L_{chord} = Diámetro de la superficie cóncava

d_d = Diámetro del aislador

Δ = 2 x desplazamiento total de diseño, d_t , si es sísmico Zona 1 o 2, o
1.5 x desplazamiento total de diseño, d_t , si es sísmico Zona 3 o 4.

Determinamos el ancho total del aislador, B , usando:

$$B = L_{chord} + 2s \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde:

L_{chord} = Diámetro de la superficie cóncava

s = Ancho de la placa cóncava

b) Altura del aislador

f.1) Elevación

Determinamos la elevación de la superficie cóncava, h , usando:

$$h = \frac{L_{chord}^2}{8R} \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde:

h = Altura del aislador

L_{chord}^2 = Diámetro de la superficie cóncava

R = Radio de curvatura

f.2) Espesor de garganta

Determinamos el espesor de garganta requerido, t , basado en el área de apoyo mínima requerida, A_b , de modo que la tensión máxima permitida del rodamiento, $\sigma_{bearing}$, no es excedido en la única placa de arriba o placa de mampostería a continuación, dependiendo de si el aislador se instala con la superficie cóncava hacia arriba o abajo.

Esto supone una distribución de 45 ° del esfuerzo de compresión a través de la garganta hasta las placas de soporte.

Área de apoyo mínimo requerido

$$A_b = \frac{P_{DL} + P_{LL}}{\sigma_{bearing}} \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

P_{DL} = Carga muerta

P_{LL} = Carga Viva

$\sigma_{bearing}$ = Tensión máxima permitida del rodamiento

Diámetro mínimo de apoyo

Ecuación 52

$$d_b = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi}}$$

Donde:

A_b = Área de apoyo mínimo requerido

d_b = Diámetro mínimo de apoyo

Espesor de la garganta

Ecuación 53
$$t = 0.5 (d_b - d_d)$$

Donde:

d_b = Diámetro mínimo de apoyo

d_d = Diámetro del aislador

t = Espesor de la garganta

Altura total

Determinamos el espesor de la placa cóncava, T1, utilizando:

$$T_1 = h + t \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde:

h = Altura del aislador

t = Espesor de la garganta

El grosor de la placa deslizante (T2) variará con los detalles para zócalo que sostiene el deslizador articulado y la rotación requisito. Tenemos que verificar con el fabricante el valor. Por estimación toman $T_2 = T_1$.

Entonces altura total del aislador:

$$H = T_1 + T_2 \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde:

T_1 = Espesor de la placa cóncava

T_2 = Espesor de la placa cóncava

4.3.6.2.2 Control de rendimiento mínimo y máximo

Es necesario que el desempeño de cualquier sistema de aislamiento, se verifique usando valores máximos y mínimos de rigidez efectiva del sistema. Estos valores son calculados de los valores mínimos y máximos de K_d y Q_d respectivamente que se encuentran usando modificación de propiedades del sistema, λ , como se indica en la tabla N°14 a continuación del GSID AASHTO

Tabla 14

Valores máximos y mínimos de K_d y Q_d

Eq. 8.1.2-1 GSID	$K_{d,max} = K_d \lambda_{max,Kd}$	(E-13)
Eq. 8.1.2-2 GSID	$K_{d,min} = K_d \lambda_{min,Kd}$	(E-14)
Eq. 8.1.2-3 GSID	$Q_{d,max} = Q_d \lambda_{max,Qd}$	(E-15)
Eq. 8.1.2-4 GSID	$Q_{d,min} = Q_d \lambda_{min,Qd}$	(E-16)

Fuente GSID (2014)

Para este dispositivo de aislamiento (FPS), la modificación de los factores solo se aplica a Q_d .

Para determinar los factores modificados de propiedades del sistema, según la guía de especificaciones de diseños, se debe considerar incluir los efectos de temperatura, edad, velocidad, contaminación entre otros, para ellos se usa la tabla N°15, los valores numéricos para estos factores se pueden obtener del Apéndice A de la Guía de especificaciones de Diseño de AASHTO (Ver anexo)

Tabla 15

Valores máximos y mínimos para los factores de modificación del sistema.”

Eq. 8.2.1-1 GSID	$\lambda_{min,Kd} = (\lambda_{min,t,Kd}) (\lambda_{min,a,Kd})$ $(\lambda_{min,v,Kd}) (\lambda_{min,tr,Kd}) (\lambda_{min,c,Kd})$ $(\lambda_{min,scrag,Kd})$	(E-17)
Eq. 8.2.1-2 GSID	$\lambda_{max,Kd} = (\lambda_{max,t,Kd}) (\lambda_{max,a,Kd})$ $(\lambda_{max,v,Kd}) (\lambda_{max,tr,Kd}) (\lambda_{max,c,Kd})$ $(\lambda_{max,scrag,Kd})$	(E-18)
Eq. 8.2.1-3 GSID	$\lambda_{min,Qd} = (\lambda_{min,t,Qd}) (\lambda_{min,a,Qd})$ $(\lambda_{min,v,Qd}) (\lambda_{min,tr,Qd}) (\lambda_{min,c,Qd})$ $(\lambda_{min,scrag,Qd})$	(E-19)
Eq. 8.2.1-4 GSID	$\lambda_{max,Qd} = (\lambda_{max,t,Qd}) (\lambda_{max,a,Qd})$ $(\lambda_{max,v,Qd}) (\lambda_{max,tr,Qd}) (\lambda_{max,c,Qd})$ $(\lambda_{max,scrag,Qd})$	(E-20)

Los factores de ajuste se aplican a factores individuales (excepto λ_v) para tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de todos los máximos (o todos los mínimos) al mismo tiempo. Estos factores son aplicados a todos los factores λ que se desvían de la unidad, pero solo a la que la unidad Arte. 8.2.2 GSID da estos factores como sigue:

- 1.00 para puentes críticos
- 0,75 para puentes esenciales
- 0.66 para todos los demás puentes

4.3.6.2.1 Resumen del rendimiento del puente

- a) Máximo desplazamiento de la superestructura (longitudinal y transversal)
- b) Máximo desplazamiento de la superestructura (resultante)
- c) Corte de columna máximo (resultante)

- d) Momento máximo de columna (sobre transversal eje)
- e) Momento máximo de columna (aproximadamente eje longitudinal)
- f) Máximo torque de la columna

CAPÍTULO V

DESARROLLO DE ANÁLISIS SÍSMICO Y USO DE AISLADORES APLICADO AL PUENTE RIECITO

5.1 Modelamiento del Puente Riecito

En este capítulo se detallará como se desarrolló el modelamiento del puente Riecito con el software CSI Bridge v20.2.0 ya que este programa nos ayudara a integrar el modelo, análisis y dimensionamiento de la estructura del puente

El modelado del puente Riecito está basado en la definición paramétrica de todos sus elementos estructurales, utilizando términos que son familiares para nosotros los ingenieros, como las líneas de layout, tramos, sección del tablero, aparatos de apoyo, estribos, pilares, juntas y pos-tensado y será sometido a un sismo de diseño para puentes convencionales según el espectro de aceleraciones obtenido de acuerdo a las especificaciones técnicas de la norma AASTHO.

5.1.1 Definición de las características de los materiales de los elementos estructurales del puente

Para el modelamiento definiremos los parámetros de resistencia de cada elemento estructural del puente

A continuación, se muestra las especificaciones técnicas de los materiales que se van a utilizar para el modelamiento del puente

Losas $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Vigas $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Estribos $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Pilar $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Acero de Refuerzo ASTM A615 Grado 60, $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$

Acero de Presfuerzo ASTM A416 G 270 BR

5.1.2 Definición de los elementos estructurales del puente Riecito

En la figura N° 18, se traza el eje vial del puente Riecito que tiene un largo total de 151 metros, y es un tramo sin ningún tipo de inclinación (tramo completamente recto)

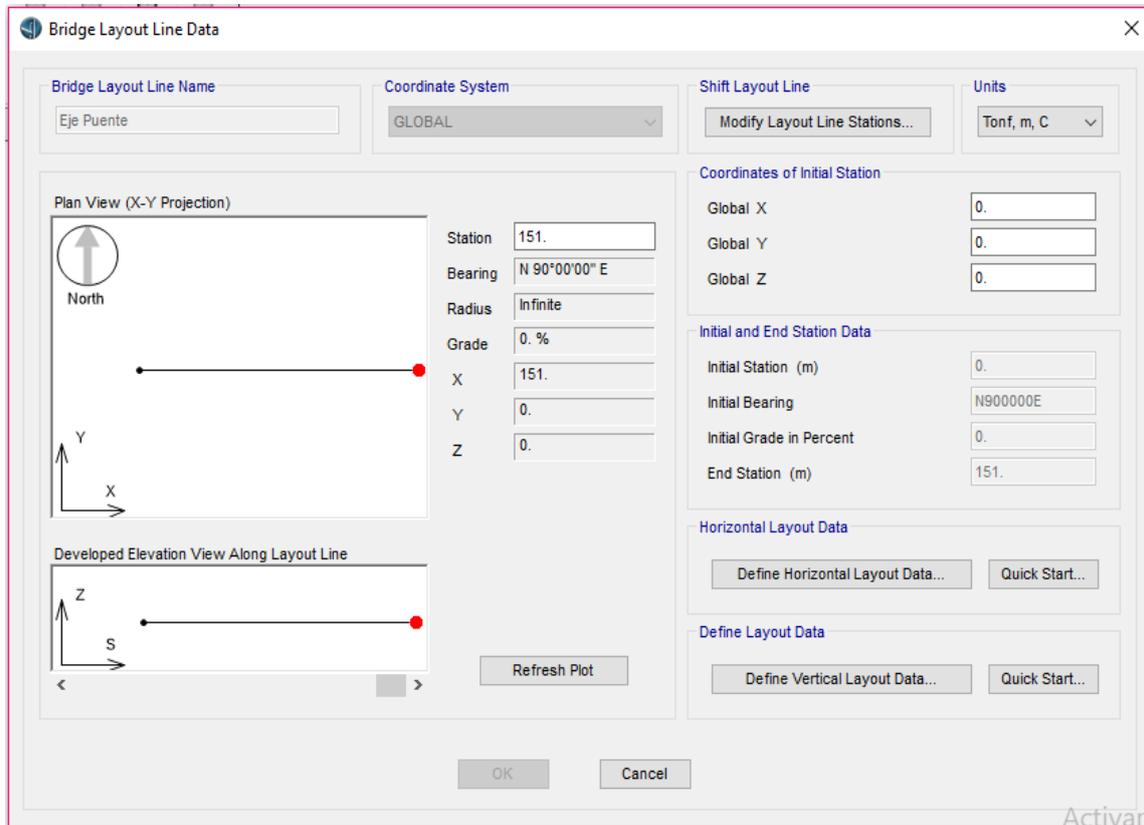


Figura 18. Trazo del eje vial del puente

Fuente: Elaboración Propia

Segundo paso se define el ancho de los carriles del puente como se observa en la figura N° 19 (carril N° 1) y en la figura N° 20 (carril N° 2) con un ancho de 3 metros desde la progresiva +0.00 m hasta +150.00 m y se está señalando en ambos casos que el tipo de borde de carril es Interior, ya que cada uno de los carriles cuenta con un hombrillo vial de acuerdo al diseño del expediente técnico

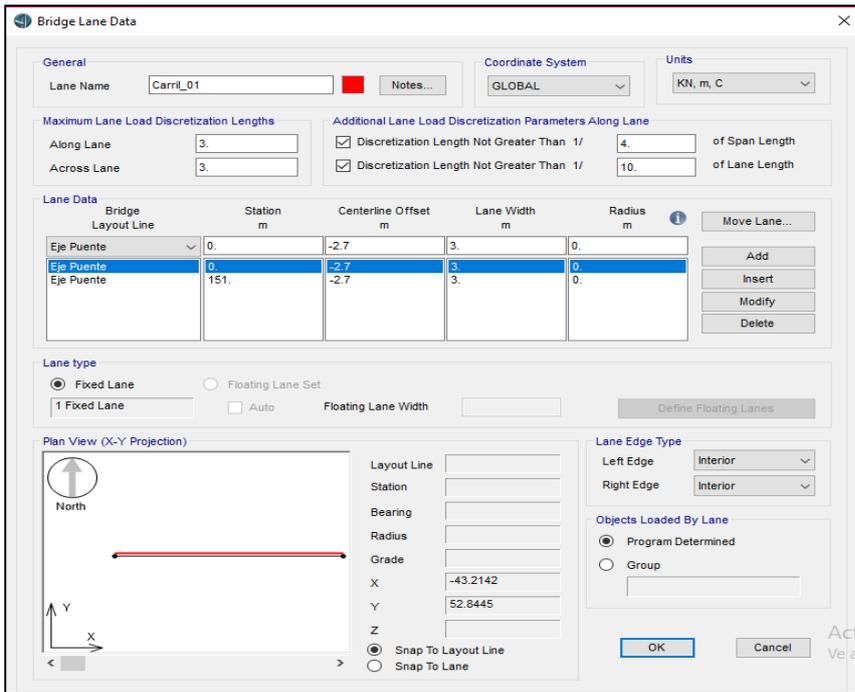


Figura 19. Definición del ancho del carril N° 1
 Fuente: Elaboración Propia

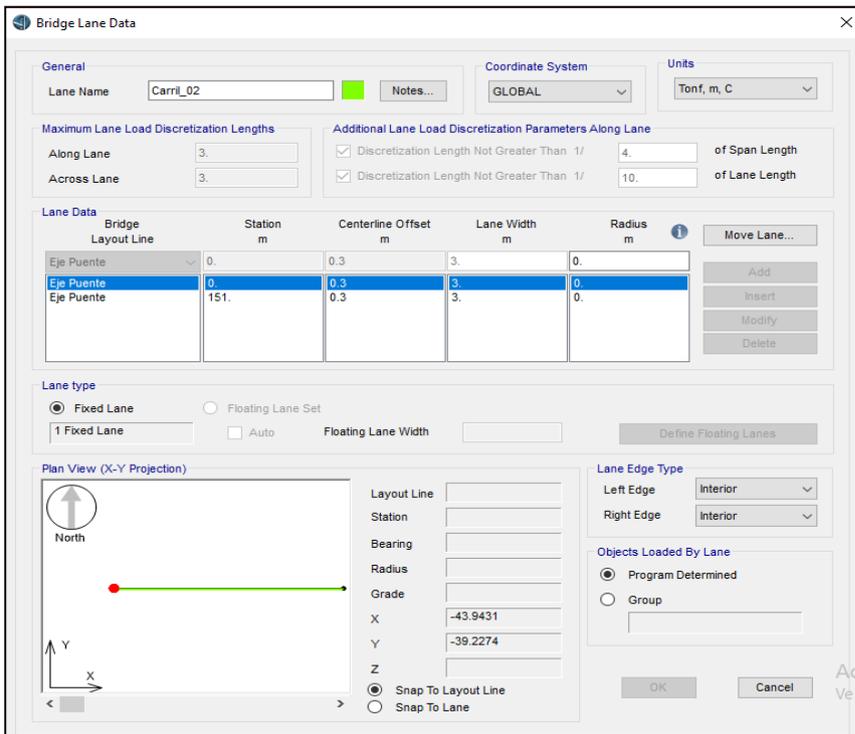


Figura 20. Definición del ancho del carril N° 2
 Fuente: Elaboración Propia

En este paso definimos las medidas de la sección del puente de acuerdo a la geometría y dimensionamiento expuesto en los planos, nuestro puente Riecito es de viga cajón de concreto preesforzado, ver figura N°21

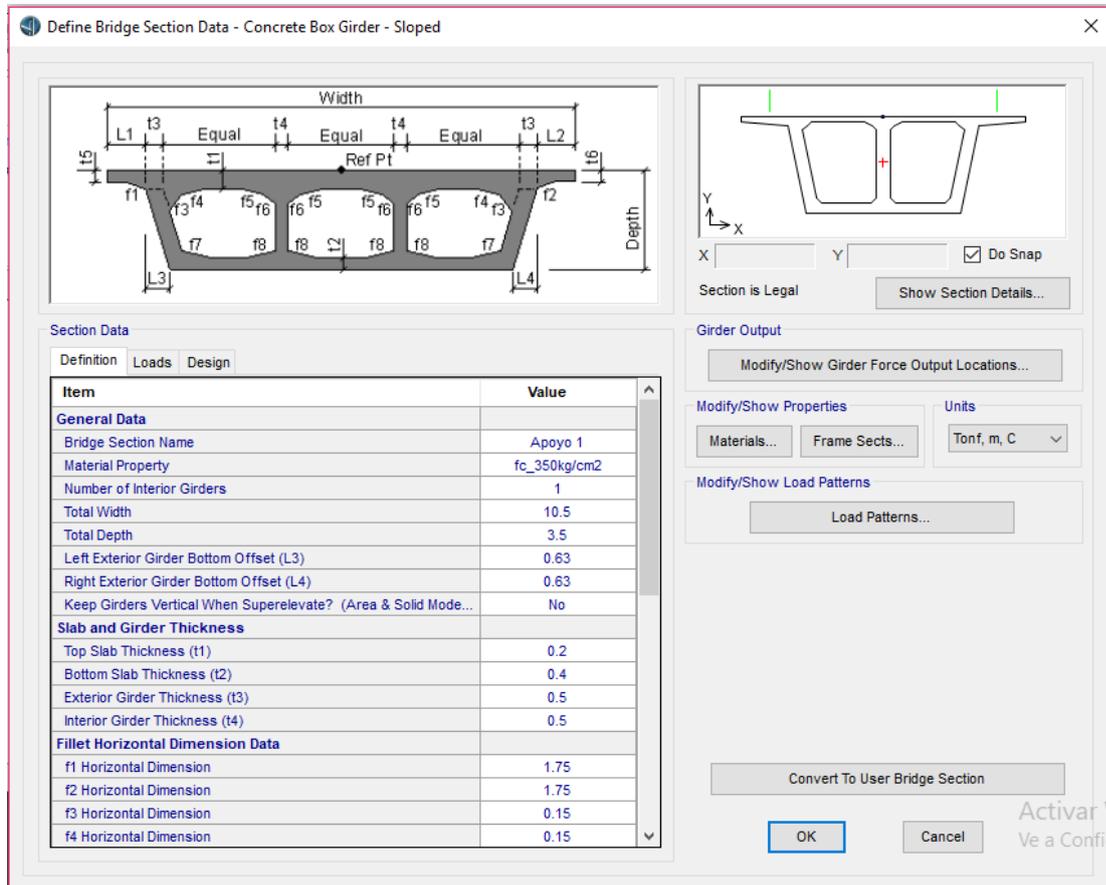


Figura 21. Definición de la sección transversal del puente
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura N° 22, Figura N°23 y la Figura N° 24 definimos los parámetros de los elementos estructurales de apoyo del puente: ingresamos la sección viga cabezal que tiene una medida de 0.90m x 1.80 m; definimos la base del pilar y finalmente definimos la parte superior del pilar del puente.

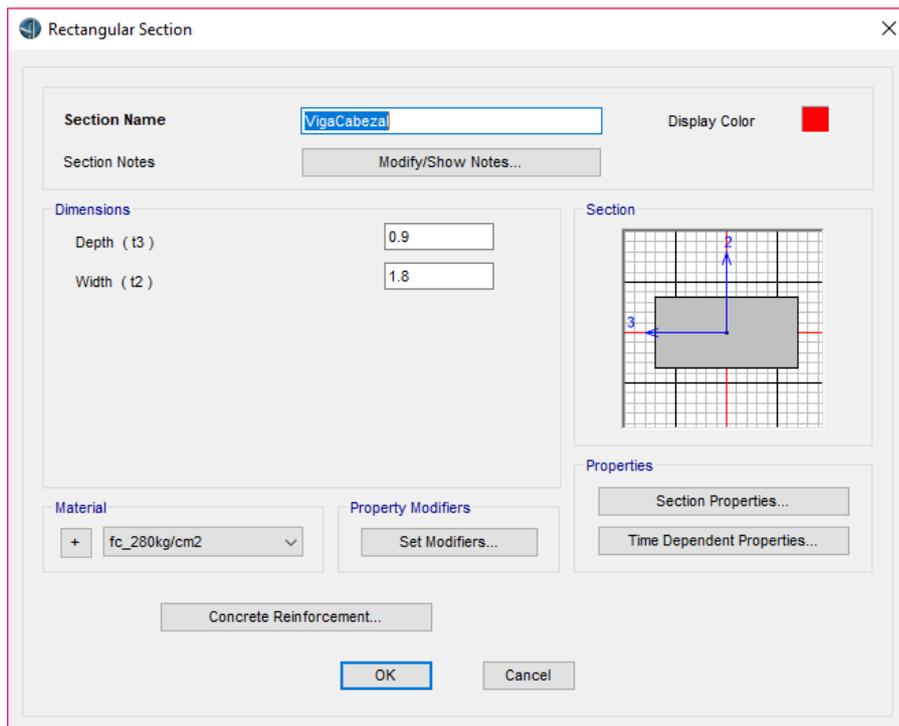


Figura 22. Definición de las medidas de viga cabezal
Fuente: Elaboración Propia

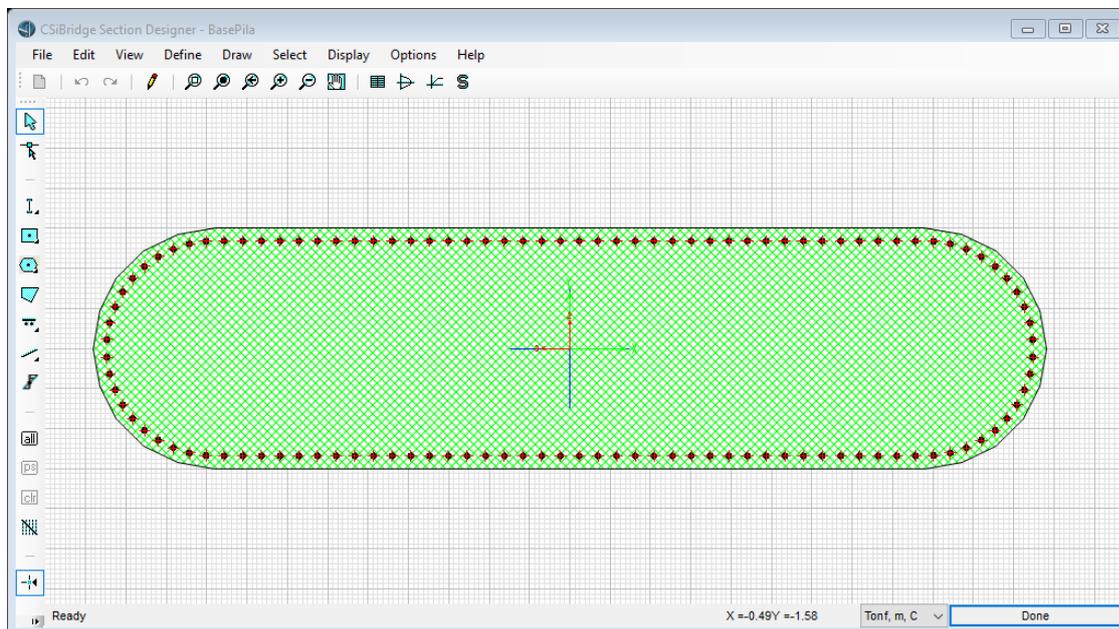


Figura 23. Definición de las medidas de la base del pilar
Fuente: Elaboración Propia

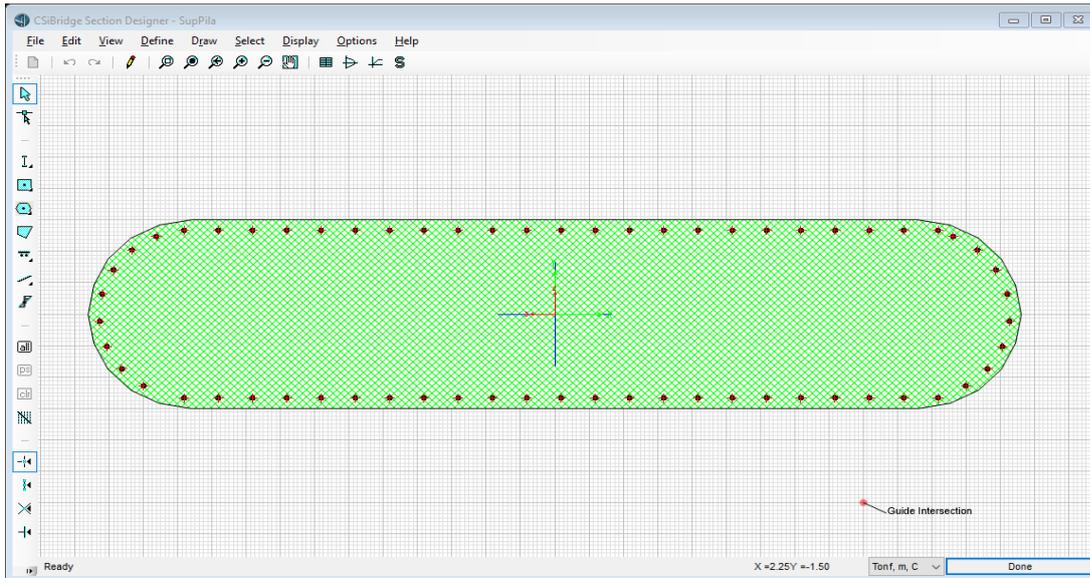


Figura 24. Definición de las medidas de la base del pilar
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, después de definir todos los elementos estructurales del puente y la definición de los materiales, obtenemos el modelamiento geométrico de todo el puente, de acuerdo a la figura N° 25 y en la figura N° 26

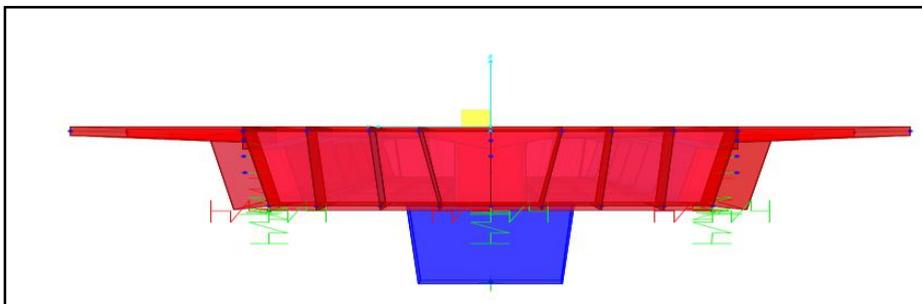


Figura 25. Modelamiento final de la sección del puente
Fuente: Elaboración Propia

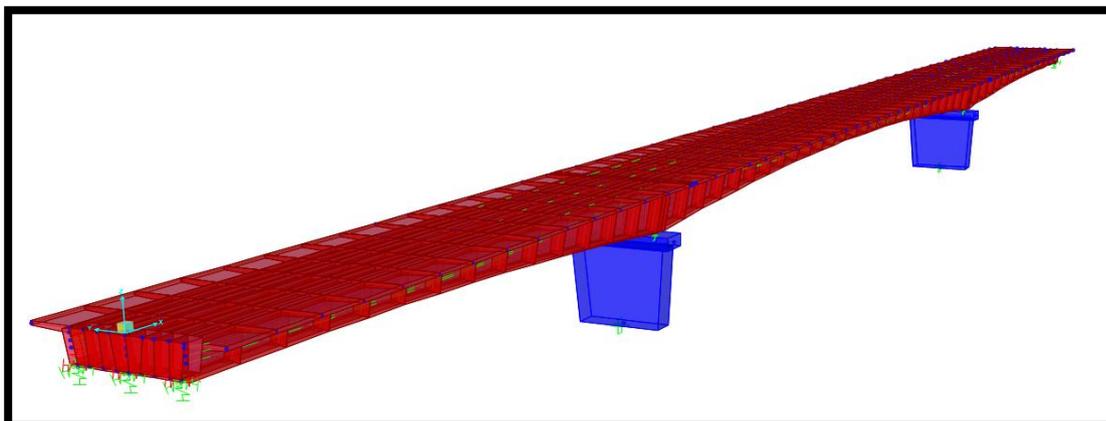


Figura 26. Modelamiento final del puente Riecito en Csi Bridge,
Fuente: Elaboración Propia

5.2 Desarrollo de Análisis Sísmico del Puente Riecito

5.2.1 Peligro Sísmico

Para determinar el peligro sísmico es necesario identificar y calcular ciertos parámetros de acuerdo a la zona donde se encuentre ubicado el puente Riecito

PGA: El valor pico de la aceleración del suelo se halla cuando el periodo estructural es 0.0 s, se halla con el mapa de isoaceleraciones que está publicado en el manual de los puentes del Perú (2016) Ver figura N°28 y N°29

En la figura N° 27 podemos observar que el puente Riecito se encuentra ubicado en el departamento de Piura,

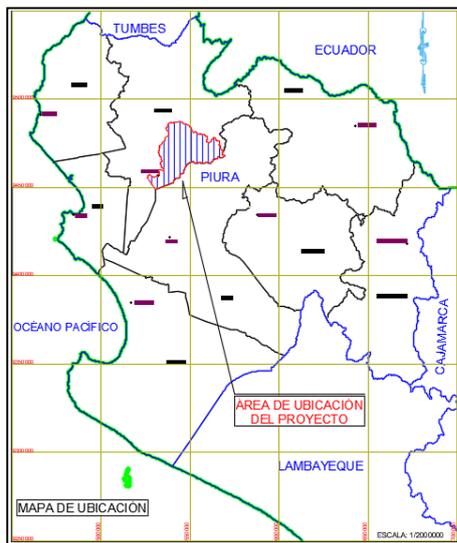


Figura 27. Ubicación del proyecto a ejecutar, Puente Riecito
Fuente: Exp. Técnico

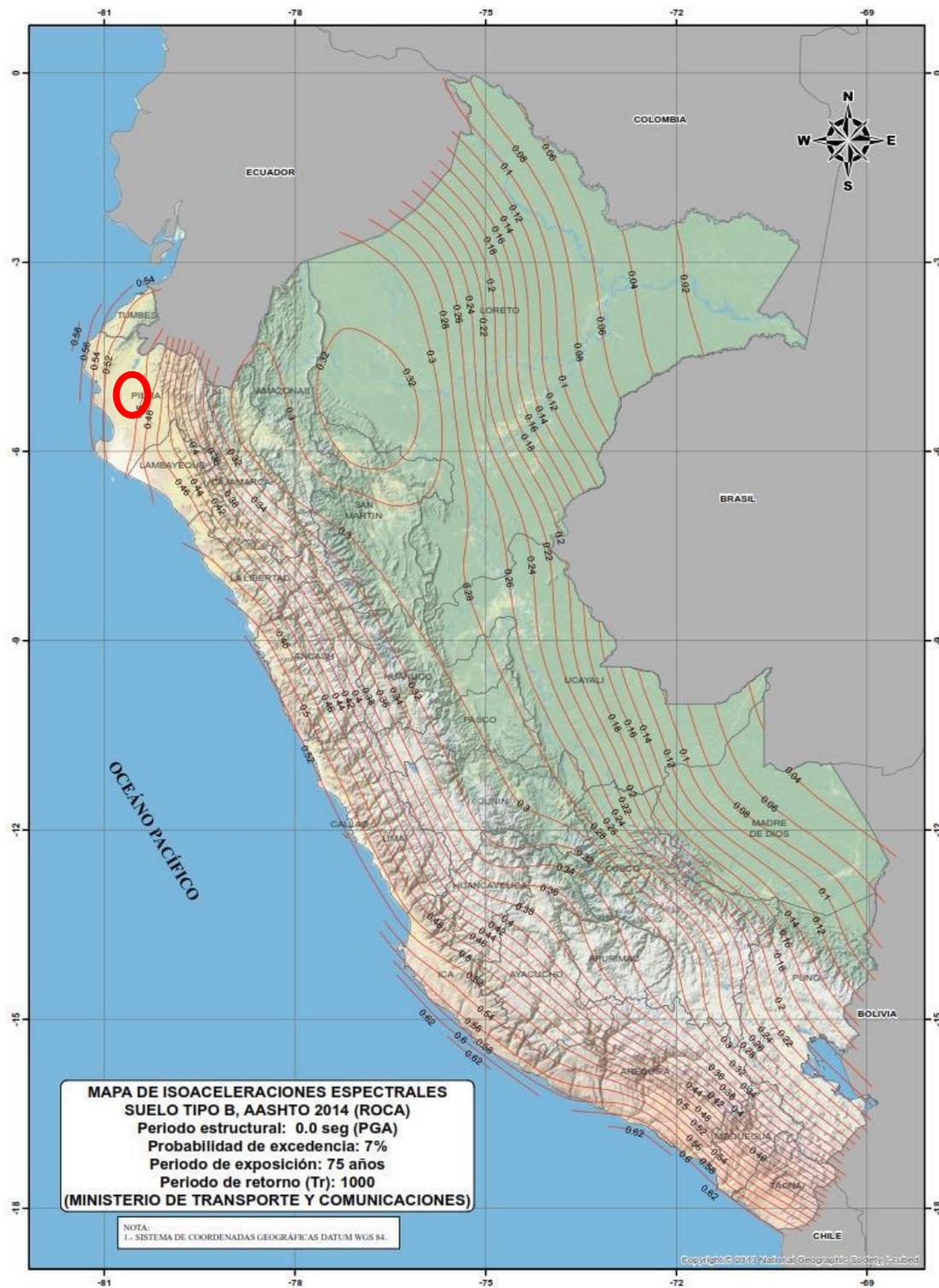


Figura 28. Distribución de ordenadas espectrales para Perú, para un periodo estructural de 0.00s con 5% de amortiguamiento y un periodo de retorno de 1000 años
 Fuente: Manual de Puentes del MTC

En la figura N°29 ubicamos en el mapa de isoaceleraciones cuando el periodo estructural es 0.0 s, nos da un valor de $PGA = 0.5\text{seg}$.



Figura 29. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 0.0 seg.
Fuente: Manual de Puentes del MTC

a) **S_s Coeficiente de aceleración espectral horizontal**; este valor de aceleración espectral se halla cuando el periodo estructural es de 0.2seg, se localiza en el mapa indicando el coeficiente espectral correspondiente a esta zona, nos arroja un valor de $S_s = 0.47$

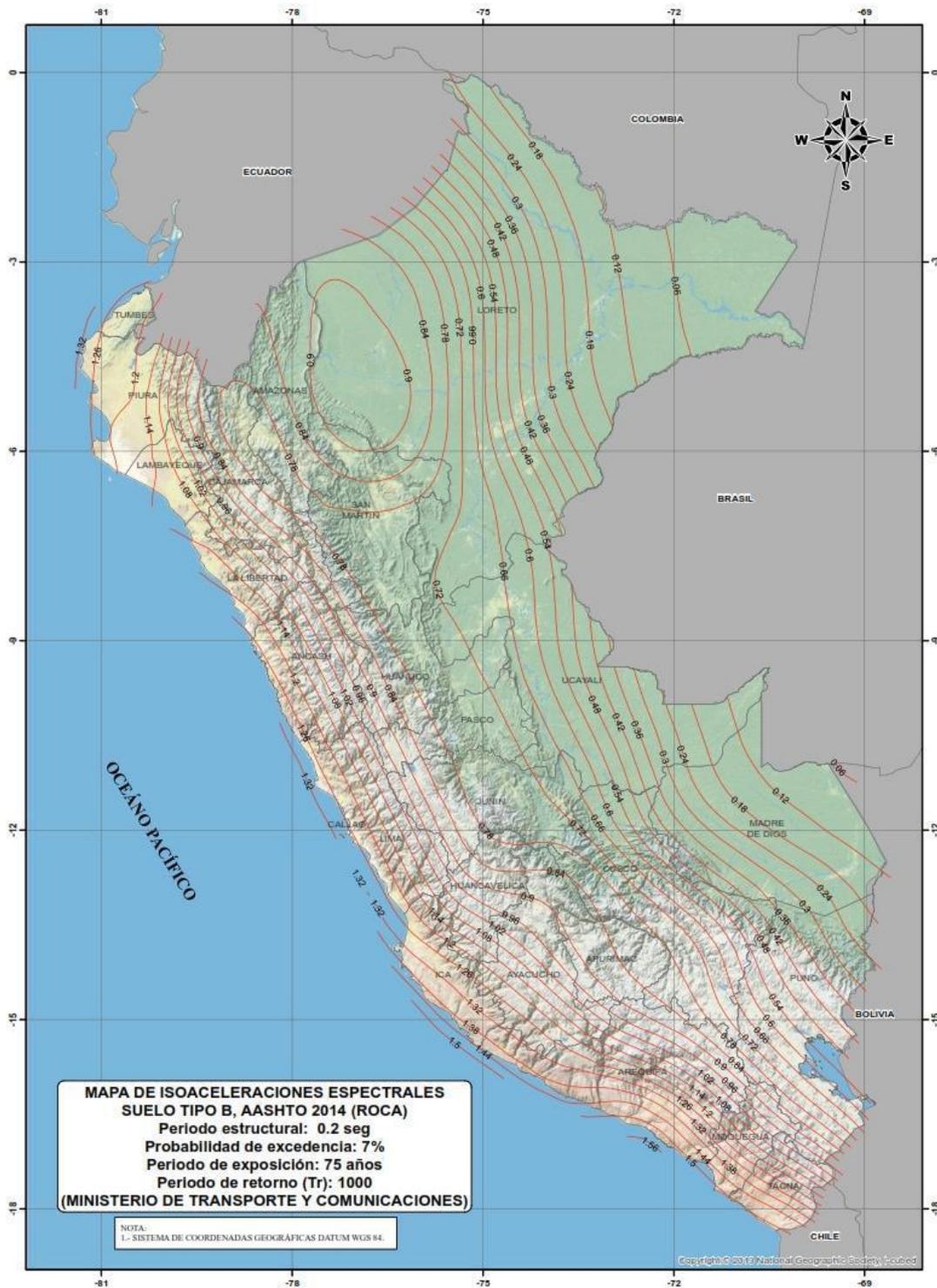


Figura 30. Mapa de isoaceleraciones espectrales para calcular S_s

Fuente: Manual de Puentes del MTC.

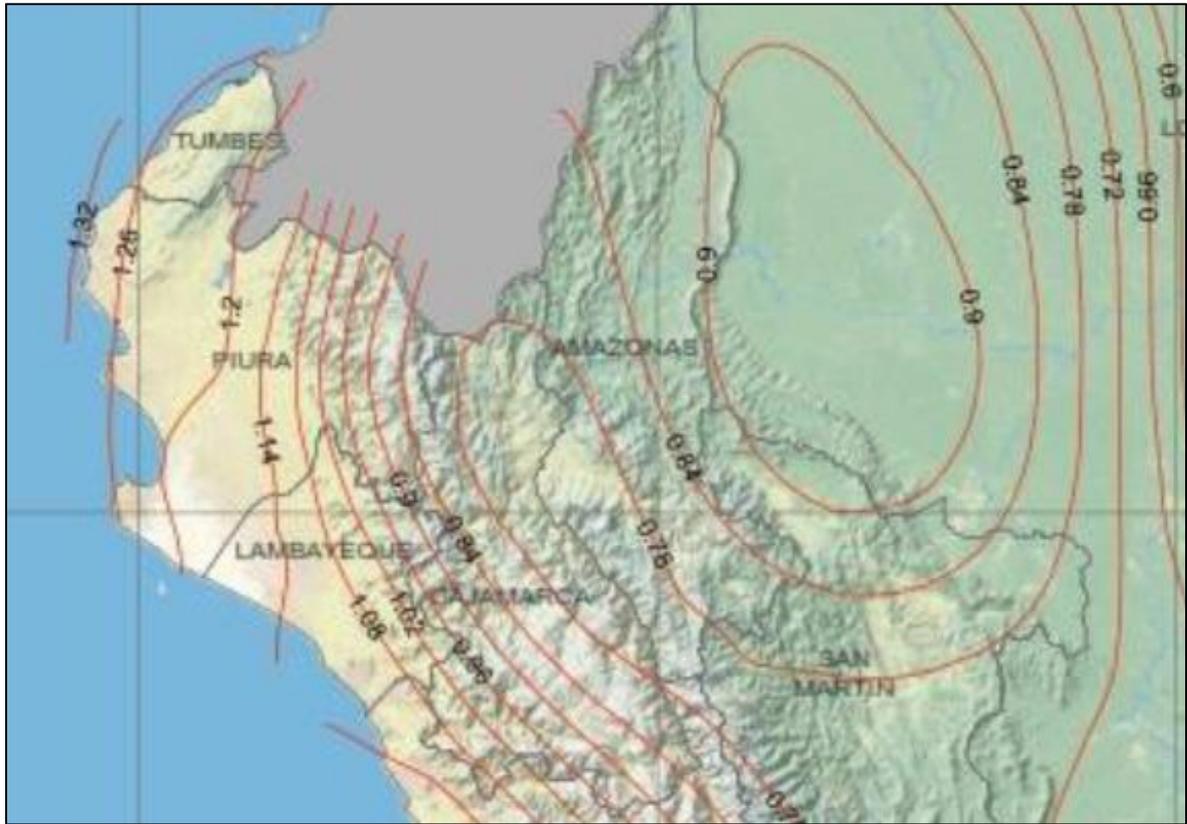


Figura 31. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 0.2 s
 Fuente: Manual de Puentes del MTC.

b) S1 Coeficiente de aceleración espectral Horizontal: Este valor de aceleración espectral se halla cuando el periodo estructural es de 0.2 a 1.0 seg, De acuerdo a la figura N° 32, ubicamos en el mapa de isoaceleraciones y nos da un valor de $S_s = 0.47$ s

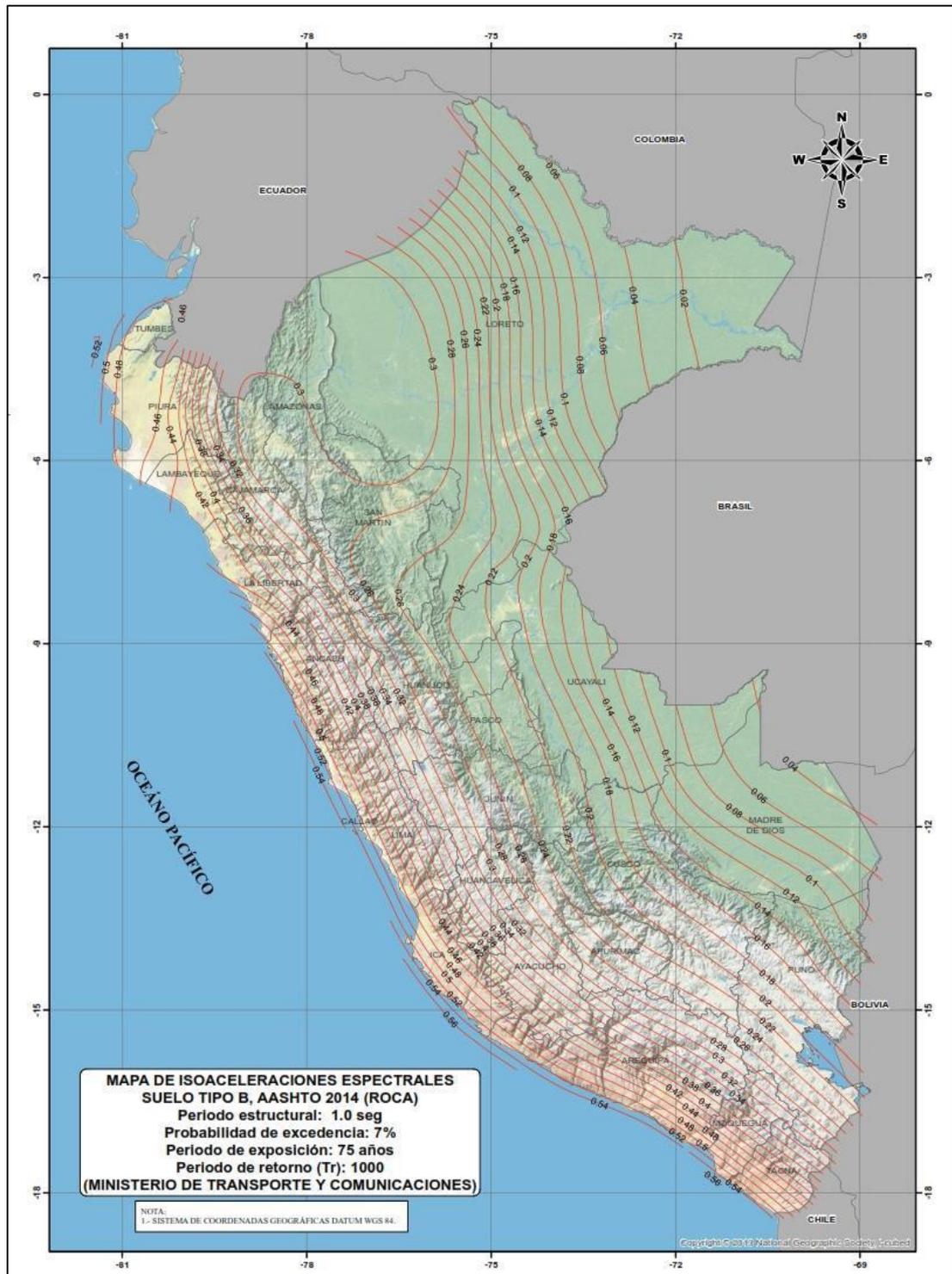


Figura 32. Distribución de ordenadas espectrales para Perú, para un periodo estructural de 1.0S con 5% de amortiguamiento y un periodo de retorno
 Fuente: Manual de puentes del MTC



Figura 33. Mapa de isoaceleraciones espectrales, Periodo estructural de 1.0 seg.
Fuente: Manual de Puentes del MTC.

d) Factores de Sitio

d.1) Clase de Sitio: Para hallar los factores de sitio, se debe definir la clasificación del suelo donde estará ubicada la estructura, según los estudios geofísicos del proyecto, o los sondeos diamantinos donde indique el tipo de suelo, en este caso se considerará Suelo tipo Roca

Es por ello que sería considerado un suelo tipo B, con la tabla N° 2.4.3.11.2.1.1-1 “Definición Clase de Sitio” del manual de puentes como se muestra en la Tabla N°16

Tabla 16

Definición Clase de Sitio''

Tabla 2.4.3.11.2.1.1-1 Definición Clase de Sitio

(Tabla 3.10.3.1-1 AASHTO)

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

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

Fuente: Manual de Puentes 2016

d.2) El Factor de Sitio Fpga: es un valor en periodo cero en el espectro de aceleración y se obtiene con la clase de sitio y el dato ya hallado de PGA, con la ayuda de la tabla 2.4.3.11.2.1.2-1 Del manual de puentes, Ver Tabla N°17, en este caso nos arroja un valor de Fpga de 1.0

Tabla 17

Valores de factor de Sitio

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-1
Valores de Factor de Sitio, F_{pga} En Periodo-Cero en el Espectro de Aceleración

(Tabla 3.10.3.2-1 AASHTO)

Clase de Sitio	Coeficiente Aceleración Pico del Terreno (PGA) ¹				
	PGA < 0.10	PGA = 0.20	PGA = 0.30	PGA = 0.40	PGA > 0.50
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.8	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F ²	*	*	*	*	*

Notas:

1. Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de PGA.
2. Llevar a cabo investigaciones geotécnicas específicas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

Fuente: Manual de Puentes 2016

d.3) Factor de Sitio Fa: es un valor para rango de periodo corto en el espectro de aceleración y se halla con la clase de sitio y el valor ya hallado de S_s , con la ayuda de la tabla

2.4.3.11.2.1.2-2 Del manual de puentes, Ver Tabla N°18 en este caso nos arroja un valor de

Fa de 1

Tabla 18

Factor de Sitio Fa

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-2
Valores de Factor de Sitio, Fa, Para rango de Periodo Corto en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-2 AASHTO)

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

Notas:

1. Usar la interpolación lineal para valores intermedios de S_s .
2. Llevar a cabo investigaciones geotecnicas especificas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

Fuente: Manual de Puentes 2016

d.4) Factor de Sitio Fv: es un valor para rango de periodo largo en el espectro de aceleración y se halla con la clase de sitio y el valor ya hallado de S_1 , con la ayuda de la tabla

2.4.3.11.2.1.2-3 Del manual de puentes, Ver tabla N°19 en este caso nos arroja un valor de Fv

de 1.0

Tabla 19

Factor de Sitio Fv

Tabla 2.4.3.11.2.1.2-3
Valores de Factor de Sitio, Fv, Para rango de Periodo Largo en el Espectro de Aceleración
(Tabla 3.10.3.2-3 AASHTO)

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

Notas:

1. Usar la interpolación lineal para valores intermedios de S_1 .
2. Llevar a cabo investigaciones geotecnicas especificas del sitio y análisis de respuesta dinámica de sitio, para todos los sitios en sitio clase F

Fuente: Manual de Puentes 2016

5.2.2 Espectro de Diseño

Para la construcción del espectro de diseño es necesario hallar 3 valores con los Factores hallados previamente, según la formula expuesta en el capítulo anterior, tendríamos entonces los siguientes Valores

$$A_s = 0.39$$

$$S_{ds} = 0.98$$

$$S_{d1} = 0.37$$

Ya que con estos valores hallaremos los periodos para la elaboración del gráfico del espectro de diseño:

$$T_o = 0.08$$

$$T_s = 0.38$$

Siguiendo las Siguietes condiciones:

Si $T < 0.08$ entonces $C =$ Ver tabla N°20

Si $0.08 < T < 0.38$ entonces $C = 0.98$

Si $T > 0.38$ entonces $C =$ Ver tabla N°20

Aplicando estas condiciones tenemos como resultado la siguiente Tabla N°20 y el grafico N°34

Tabla 20

Valores para gráfico de espectro de respuesta” Fuente: Elaboración Propia

T	C
0.00	0.39
0.05	0.78
0.10	0.98
0.15	0.98
0.20	0.98
0.25	0.98
0.30	0.98
0.35	0.98
0.40	0.93
0.60	0.62
0.70	0.53
0.75	0.49
0.80	0.46
0.90	0.41
1.00	0.37
1.20	0.31
1.40	0.26
1.60	0.23
1.80	0.21
2.00	0.19
2.50	0.15
3.00	0.12
3.50	0.11
4.00	0.09
4.50	0.08
5.50	0.07
6.00	0.06
9.00	0.04

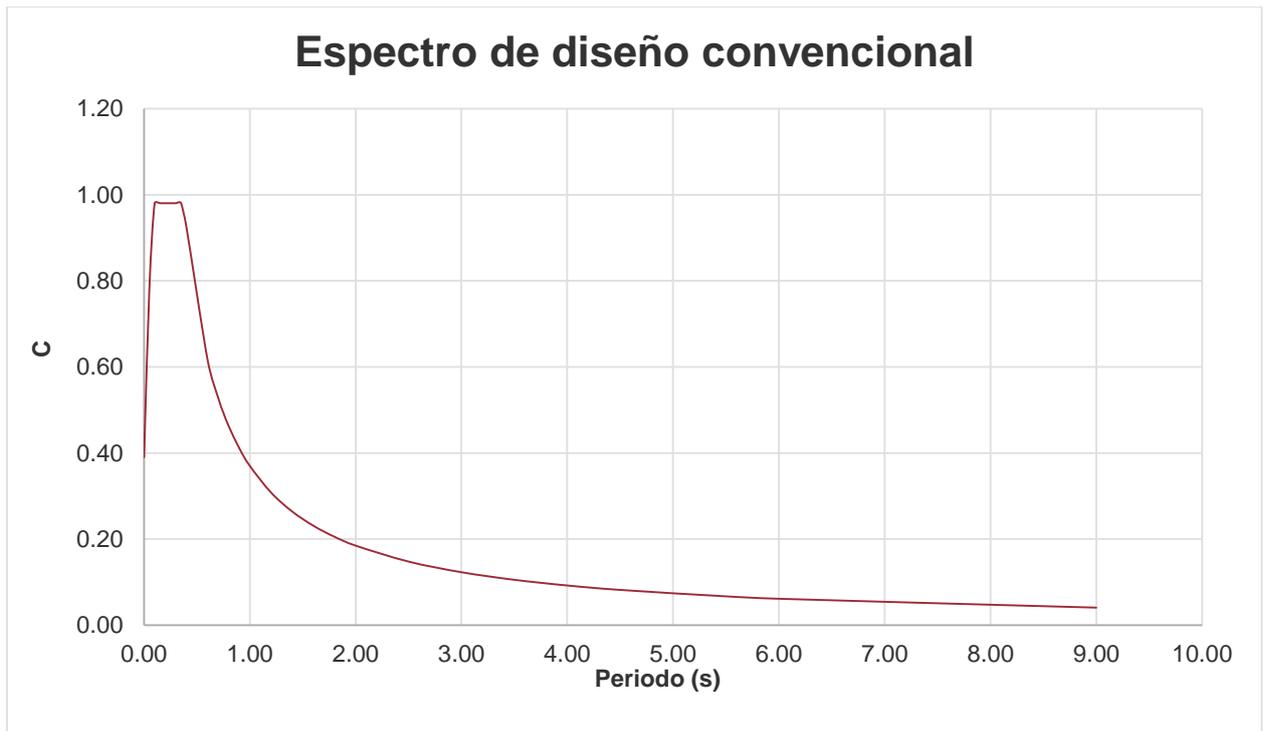


Figura 34 Espectro de respuesta de diseño convencional del puente Riecito

Fuente: Elaboración Propia

5.2.3 Categoría Sísmica de Diseño

Tabla 21

Categoría sísmica de diseño

Value of $S_{D1} = F_v S_1$	SDC
$S_{D1} \leq 0.15$	A
$0.15 \leq S_{D1} \leq 0.30$	B
$0.30 \leq S_{D1} \leq 0.50$	C
$0.50 \leq S_{D1}$	D

Fuente: AASHTO

En este caso como el valor de S_{D1} que hallamos es de 0.37, nuestra categoría sísmica de diseño sería C

5.3 Aisladores Sísmicos

5.3.1 Procedimiento de Análisis

5.3.1.1 Método Simplificado

a. Desplazamiento inicial y propiedades:

$$d = 10 S_{D1} = 3.7 \text{ in}$$

$$Q_d = 0.05 * W_{SS} = 553.72 \text{ k}$$

$$K_d = 0.05(W/d) = 149.65 \text{ k/in}$$

b. Propiedades iniciales de los aisladores en los apoyos

$$Q_{d,j} = Q_d(W_j/W) \quad Q_{d,1} = 31.68 \text{ k}$$

$$Q_{d,2} = 245.18 \text{ k}$$

$$Q_{d,3} = 245.18 \text{ k}$$

$$Q_{d,4} = 31.68 \text{ k}$$

$$K_{d,j} = K_d(W_j/W) \quad K_{d,1} = 8.56 \text{ kips/in}$$

$$K_{d,2} = 66.26 \text{ kips/in}$$

$$K_{d,3} = 66.27 \text{ kips/in}$$

$$K_{d,4} = 8.56 \text{ kips/in}$$

c. Rigidez efectiva de los pilares y rigidez efectiva de los pilares con sistema de aisladores:

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

$$K_{eff,1} = 17.11 \text{ k/in}$$

$$K_{eff,2} = 124.74 \text{ k/in}$$

$$K_{eff,3} = 124.75 \text{ k/in}$$

$$K_{eff,4} = 17.11 \text{ k/in}$$

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

α_1	1.71E-03
α_2	1.33E-01
α_3	1.33E-01
α_4	1.71E-03

A. Rigidez efectiva total:

$$K_{eff} = \sum_{j=1}^m K_{eff,j}$$

283.71 k/in

B. Desplazamientos del sistema de aislador en cada apoyo:

$$d_{isol,j} = \frac{d}{1 + \alpha_j}$$

$d_{isol,1}$	3.69	in
$d_{isol,2}$	3.27	in
$d_{isol,3}$	3.27	in
$d_{isol,4}$	3.69	in

C. Rigidez del sistema de aisladores en cada apoyo:

$$K_{isol,j} = \frac{Q_{d,j}}{d_{isol,j}} + K_{d,j}$$

$K_{isol,1}$	17.14	k/in
$K_{isol,2}$	141.35	k/in
$K_{isol,3}$	141.35	k/in
$K_{isol,4}$	17.14	k/in

D. Desplazamiento de la subestructura en cada apoyo:

$$d_{sub,j} = d - d_{isol,j}$$

$d_{sub,1}$	6.33E-03	in
$d_{sub,2}$	4.35E-01	in
$d_{sub,3}$	4.35E-01	in
$d_{sub,4}$	6.33E-03	in

E. Carga lateral en la subestructura en cada apoyo:

$$F_{sub,j} = K_{sub,j} d_{sub,j}$$

$F_{sub,1}$	63.31	k
$F_{sub,2}$	461.56	k
$F_{sub,3}$	461.57	k
$F_{sub,4}$	63.30	k

F. Fuerza de corte de columna en cada apoyo :

$$F_{col,j,k} = \frac{F_{sub,j}}{\# \text{ of columns at support } j}$$

$F_{col,2,1-3}$	461.56	k
$F_{col,3,1-3}$	461.57	k

G. Periodo Efectivo y Ratio de amortiguamiento:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W_{eff}}{gK_{eff}}} \quad 1.33 \quad \text{segundos}$$

$$\xi = \frac{2 \sum_j (Q_{d,j} (d_{isol,j} - 0))}{\pi \sum_j (K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2)} = \quad \xi = \quad 0.07$$

H. Factor de amortiguamiento:

$$B_L = \begin{cases} \left(\frac{\xi}{0.05}\right)^{0.3}, & \xi < 0.3 \\ 1.7, & \xi \geq 0.3 \end{cases} \quad (\text{B-16})$$

$$\xi = \quad 2.01 \quad \geq 0.30$$

$$B_L = \quad 1.7 \quad \text{in}$$

$$d = \quad 4.28 \quad \text{in}$$

En el método simplificado como se ha mencionado en el capítulo anterior, se tiene que lograr la convergencia, para esto se debe iterar de modo que se logre la convergencia en el desplazamiento, obteniendo los siguientes resultados Ver tabla N°22

Tabla 22

Resultados método simplificado

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
	W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{isol,j}$	$K_{isol,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j}d_{is}$ ol,j	$K_{eff,j}(d_{isol,j}+d_{sub,j})^2$
Abu t1	633.62	31.68	6.50	10,000.0 0	0.00	12.9 8	4.87	13.00	0.01	63.32	154.3 3	308.86
Pier 1	4,903.5 3	245.1 8	50.27	1,062.07	0.10	95.9 9	4.44	105.5 2	0.44	468.1 9	1,087. 80	2,283.69
Pier 2	4,903.6 9	245.1 8	50.27	1,062.07	0.10	95.9 9	4.44	105.5 3	0.44	468.2 1	1,087. 84	2,283.76
Abu t2	633.55	31.68	6.49	10,000.0 0	0.00	12.9 8	4.87	13.00	0.01	63.31	154.3 1	308.82
	11,074. 39	553.7 2	113.5 2			217. 94				1,063 .04	2,484. 28	5,185.14

Fuente: Elaboración Propia

$T_{eff} =$
 $\xi =$

2.29 Periodo Efectivo
0.31 Ratio de amortiguamiento

B_L

1.7 Factor de amortiguamiento
En la 8ava iteración se logra la

d

4.88 convergencia

5.3.1.2 Análisis Multimodal Espectral

a) Rigidez y Fuerza por aislador

n= 3

$$Q_{d,i} = \frac{Q_{d,j}}{n}$$

$Q_{d,1}$	10.56	k
$Q_{d,2}$	81.73	k
$Q_{d,3}$	81.73	k
$Q_{d,4}$	10.56	k

$$K_{d,i} = \frac{K_{d,j}}{n}$$

$K_{d,1}$	2.17	k/in
$K_{d,2}$	16.76	k/in
$K_{d,3}$	16.76	k/in
$K_{d,4}$	2.16	k/in

b) Rigidez inicial y desplazamiento fluido

$$K_{u,i} = 10K_{d,i} \qquad 167.6 \text{ k/in}$$

$$d_{y,i} = \frac{Q_{d,i}}{K_{u,i} - K_{d,i}} \qquad 0.54 \text{ in}$$

por lo tanto $dy,i = 0 \text{ in}$

c) Rigidez efectiva de aislador

$K_{isol,1}$	4.332920257	k/in
$K_{isol,2}$	35.17489265	k/in
$K_{isol,3}$	35.17607543	k/in
$K_{isol,4}$	4.332432504	k/in

5.3.1.2.1 Espectro de Diseño con aislador sísmico

Para construir el gráfico de espectro de respuesta con aislamiento sísmico, nos basamos en las condiciones:

$T > 1.82$ entonces $C = C_1/1.7$

$T < 1.82$ entonces $C = C_1$

Obteniendo los valores en la tabla N° 23, con estos datos se realiza el gráfico del espectro con aislamiento sísmico (Ver figura N°35)

Tabla 23

Valores para gráfico de espectro de respuesta con aislamiento sísmico de puente Riecito

T	C
0.00	0.39
0.05	0.78
0.10	0.98
0.15	0.98
0.20	0.98
0.25	0.98
0.30	0.98
0.35	0.98
0.40	0.93
0.60	0.62
0.70	0.53
0.75	0.49
0.80	0.46
0.90	0.41
1.00	0.37
1.20	0.31
1.40	0.26
1.60	0.23
1.80	0.21
2.00	0.11
2.50	0.09
33.00	0.07
3.50	0.06
4.00	0.05
4.50	0.05
5.50	0.04
6.00	0.04
9.00	0.02

Fuente: Elaboración Propia

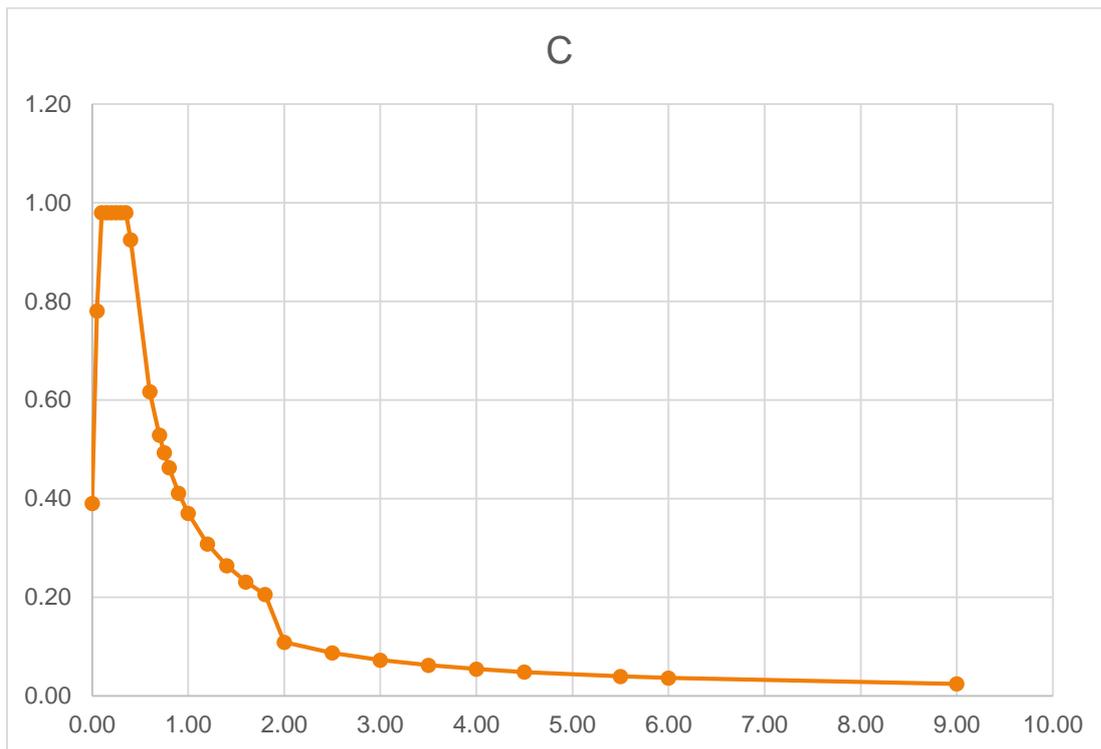


Figura 35. Espectro de respuesta del puente Riecito con aislamiento sísmico
Fuente: Elaboración Propia

Obteniendo los resultados de rigidez de aislador se procede a realizar el análisis multimodal de modelo de elementos finitos.

Iterando hasta lograr la convergencia se obtienen los siguientes datos (Ver Tabla N°24) y el siguiente espectro (Ver figura N°36)

Tabla 24

Resultados método multimodal con análisis de elementos finitos”

W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	disol	$K_{isol,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j}d_i$ sol,j	$K_{eff,j}(d_{isol,j}+$ $d_{sub,j})^2$
633.62	31.6811 55	6.50	10000	1.28E -03	12.7 6	5.05	12.7 7	0.00E +00	0.00	159.9 9	325.42
4,903.53	245.176 492	50.27	1062.06 8966	9.75E -02	94.3 5	4.4759	105. 04	5.74E- 01	609.7 3	1097. 39	2406.15
4,903.69	245.184 346	50.27	1062.06 8966	9.75E -02	94.3 5	4.4759	105. 05	5.74E- 01	609.7 3	1097. 42	2406.23
633.55	31.6775 91	6.49	10000	1.28E -03	12.7 6	5.05	12.7 7	0.00E +00	0.00	159.9 7	325.38
11074.3916 8					214. 22				1219. 47	2514. 77	5463.18

$\xi =$ 0.2930
 1.69976
 BL= 403
 2.29820
 Teff= 988

0.8T 1.8385
 eff 679

Fuente: Elaboración Propia

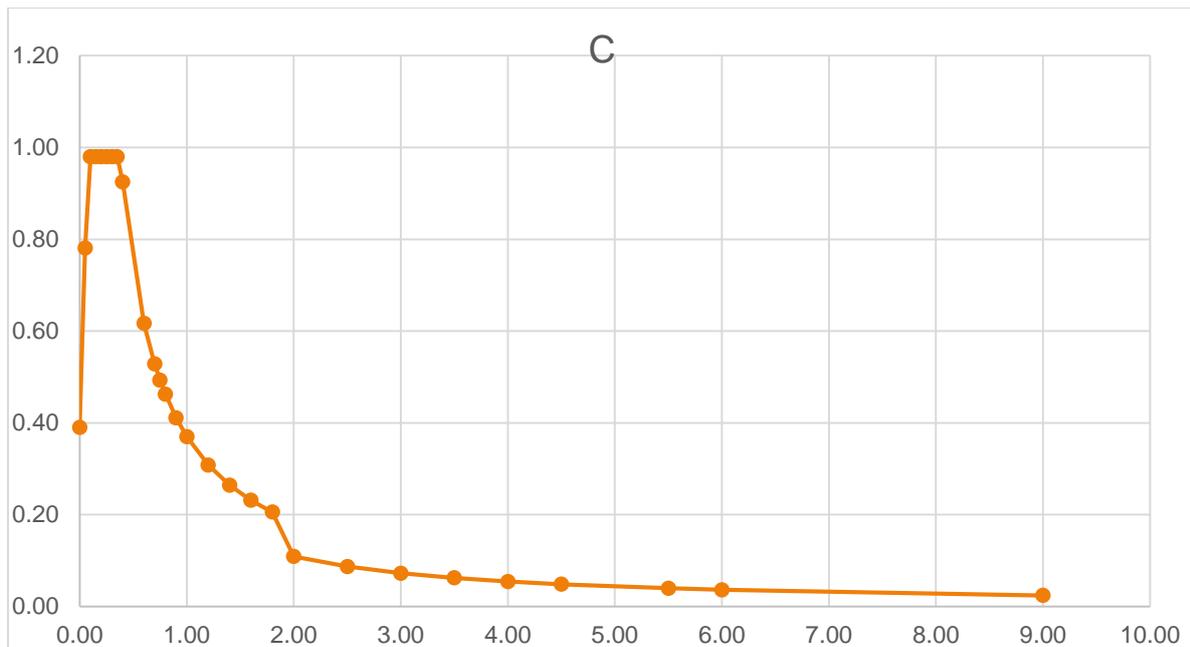


Figura 36. Espectro de Puesto Riecito con aislamiento sísmico
Fuente: Elaboración Propia

5.3.2 Diseño de aisladores

5.3.2.1 Diseño de aislador con núcleo de plomo

Para el diseño de los aisladores necesitamos saber el desplazamiento total de diseño, además de las propiedades de los aisladores.

Máximo desplazamiento de aisladores en estribo

Caso de carga N° 1

$$u_1 = u_L + 0.3u_T = 1.0(5.07) + 0.3(0) = 5.07 \text{ in}$$

$$v_1 = v_L + 0.3v_T = 1.0(0) + 0.3(5.07) = 1.52 \text{ in}$$

Entonces la resultante sería: $R_1 = 5.25 \text{ in}$

Caso de carga N° 2

$$u_2 = 0.3u_L + u_T = 0.3(1.52) + 1.0(5.07) = 1.52 \text{ in}$$

$$v_2 = 0.3v_L + v_T = 0.3(5.07) + 1.0(1.52) = 4.55 \text{ in}$$

Entonces la resultante sería: $R1 = 4.80$ in

Desplazamiento total de diseño

$$d_t = \text{Máx. (R1, R2)} \\ 5.25$$

Una vez calculado el desplazamiento de diseño total del aislador con núcleo de plomo podemos iniciar con el cálculo de las dimensiones del aislador, siguiendo los pasos mencionados en el capítulo N° 4 AISLAMIENTO SISMICO APLICADO EN PUENTES CONVENCIONALES, en este caso plantearemos el procedimiento del aislador en el estribo del puente Riecito

5.3.2.1.1. Dimensionamiento

a) Diámetro del núcleo de plomo

$$d_L = \sqrt{\frac{Q_d}{0.9}} = 3.43 \text{ in}$$

$$d_t = 5.2511062 \text{ in}$$

$$P_{DL} = 221.12 \text{ k}$$

$$P_{LL} = 131.00 \text{ k}$$

$$P_{SL} = 93.88 \text{ k}$$

$$P_{WL} = 0.28 \text{ k}$$

b) Área del plano y diámetro del aislador

$$A_b = \frac{P_{DL} + P_{LL}}{1.0} \text{ in}^2 = 352.12 \text{ in}^2$$

$$B = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi} + d_L^2} = 21.45 \text{ in}$$

Redondear B y calcular = 22.00 in

$$A_{b=} = \frac{\pi}{4}(B^2 - d_L^2) = 370.92 \text{ in}^2$$

$$B_o = B + 2(0.5) = 23.00 \text{ in}$$

c) Espesor del Elastómero y el número de capas

$$K_d = \frac{GA_b}{T_r} \quad G = \begin{matrix} 100 \text{ psi} \\ 0.1 \text{ ksi} \end{matrix}$$

$$T_r = \frac{GA_b}{K_d} = 17.13 \text{ in}$$

tr = 0.50 in

$$n = \frac{T_r}{t_r} = 34.26401482$$

Redondeamos el # de capas = 23

d) Altura Total

$$H = nt_r + (n - 1)t_s + 2t_c$$

ts = 0.188 in
tc = 2 in
= 19.636 in

e) Comprobaciones de tamaño

$$\frac{B}{3} \geq d_L \geq \frac{B}{6} \qquad 7.33 \geq d_L \geq 3.67$$

Si 3.43

$$K_{d,\min} = \frac{0.025 W}{d} = 1.09 \text{ k/in}$$

$$K_d = \frac{GA_b}{T_r} = 2.17 \text{ k/in} \geq K_{d,m}$$

La primera condición de diseño es que el Kd debe ser mayor al Kdmin, en nuestro caso si cumple la condición.

5.3.2.1.2 Verificaciones de diseño por corte y estabilidad

a) Verificaciones del límite de deformación

$$\sigma_s = \frac{P_{DL}}{A_b} = 0.63$$

$$S = \frac{A_b}{\pi B t_r} = 10.73$$

$$\gamma_c = \frac{D_c}{GS} \sigma_s = 0.59$$

$$\gamma_{s,eq} = \frac{d_t}{T_r} = 0.31$$

$$\gamma_r = \frac{D_r B^2 \theta}{t_r T_r} = 0.21$$

Finalmente reemplazamos en la siguiente ecuación

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r = 1.00 \leq 5.5$$

La segunda condición viene por la verificación del límite de deformación, la condición que debe de cumplir es que γ_c debe ser menor o igual a 5.5, en nuestro caso si cumple la condición.

Estabilidad de la carga vertical en estado deformado

$$E = 3G = 0.30 \text{ ksi}$$

$$E_b = E (1 + 0.67S^2) = 23.46 \text{ ksi}$$

$$I = \frac{\pi B^4}{64} = 11,499.01 \text{ in}^4$$

$$K_\theta = \frac{E_b I}{T_r} = 15,743.72 \text{ kin/rad}$$

$$K_d = \frac{GA_b}{T_r} = 2.17 \text{ k/in}$$

$$\frac{4\pi^2 K_\theta}{K_d H_{eff}^2} \gg 1$$

$$P_{cr(\Delta=0)} = \pi \sqrt{K_d K_\theta} = 580.01 \text{ k}$$

$$\frac{P_{cr(\Delta=0)}}{P_{DL} + P_{LL}} \geq 3 = 1.65 \geq 3$$

La tercera condición está dada por la verificación de estabilidad de estado deformado, la condición que debe cumplir es que P_{cr} tiene que ser mayor o igual a 3, en nuestro caso no cumple

Estabilidad de la carga vertical en estado no deformado

El puente Riecito se encuentra ubicado en la Zona N° 4

$$\Delta = 1.5d_t = 7.88$$

$$\delta = 2 \cos^{-1}\left(\frac{\Delta}{B}\right) = 2.41$$

$$\frac{A_r}{A_{gross}} = \frac{(\delta - \sin\delta)}{\pi} = 0.56$$

$$P_{cr(\Delta)} = \frac{A_r}{A_{gross}} P_{cr(\Delta=0)} = 325.65 \text{ k}$$

Tiene que cumplir lo siguiente

$$\frac{P_{cr(\Delta)}}{1.2P_{DL} + P_{SL}} \geq 1 = 0.91 \geq 1$$

En nuestro caso podemos observar que no está cumpliendo la condición de estabilidad en estado no deformado

Podemos decir que este diseño de aislador sísmico de núcleo de plomo está cumpliendo con los criterios de límite de corte, pero no está cumpliendo la estabilidad de carga vertical en los estados deformados y no deformados, por consiguiente se va a tener que rediseñar, y repetir los pasos desarrollados anteriormente.

$$\text{Modificación de B} = 30.00 \text{ in}$$

$$A_b = \frac{\pi}{4}(B^2 - d_L^2) = 697.64 \text{ in}^2$$

$$B_o = B + 2(0.5) = 31.00 \text{ in}$$

Espesor del Elastómero y el número de capas

$$K_d = \frac{GA_b}{T_r} \qquad G = \begin{array}{l} 100 \text{ psi} \\ 0.1 \text{ ksi} \end{array}$$

$$T_r = \frac{GA_b}{K_d} \qquad = \begin{array}{l} 32.22 \text{ in} \\ 0.50 \text{ in} \end{array}$$

tr

$$n = \frac{T_r}{t_r} \qquad = 64.44$$

Redondeamos el # de capas = 65

Altura Total

$$H = nt_r + (n - 1)t_s + 2t_c$$

ts = 0.188 in
tc = 2 in
= 48.532 in

Comprobación de tamaño

$$\frac{B}{3} \geq d_L \geq \frac{B}{6}$$

10.00 Si 5.00

$$K_{d,\min} = \frac{0.025 W}{d} = 1.09 \text{ k/in}$$

$$K_d = \frac{GA_b}{T_r} = 2.17 \text{ k/in} \geq K_{d,m}$$

La primera condición de diseño es que el Kd debe ser mayor al Kdmin, en nuestro caso si cumple la condición.

Verificaciones del límite de deformación

$$\sigma_s = \frac{P_{DL}}{A_b} = 0.32$$

$$S = \frac{A_b}{\pi B t_r} = 14.80$$

$$\gamma_c = \frac{D_c}{GS} \sigma_s$$

$$\gamma_{s,eq} = \frac{d_t}{T_r} = 0.21$$

$$= 0.16$$

$$\gamma_r = \frac{D_r B^2 \theta}{t_r T_r} = 0.21$$

Finalmente remplazamos en la siguiente ecuación

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r = 0.48 \leq 5.5$$

La segunda condición viene por la verificación del límite de deformación, la condición que debe de cumplir es que γ_c debe ser menor o igual a 5.5, en nuestro caso si cumple la condición.

Estabilidad de la carga vertical en estado deformado

$$\begin{aligned}
 E &= 3G \\
 E_b = E(1 + 0.67S^2) &= 0.30 \text{ ksi} \\
 &= 44.35 \text{ ksi} \\
 I &= \frac{\pi B^4}{64} = 39760.78 \text{ in}^4 \\
 K_\theta &= \frac{E_b I}{T_r} = 54729.03 \text{ kin/rad} \\
 K_d &= \frac{GA_b}{T_r} = 2.17 \text{ k/in} \\
 P_{cr(\Delta=0)} &= \pi \sqrt{K_d K_\theta} \\
 &= 1081.42 \text{ k} \\
 \frac{P_{cr(\Delta=0)}}{P_{DL} + P_{LL}} &\geq 3 \\
 &= 3.07 \geq 3
 \end{aligned}$$

La tercera condición está dada por la verificación de estabilidad de estado deformado, la condición que debe cumplir es que por tiene que ser mayor o igual a 3, en nuestro caso si cumple

Estabilidad de la carga vertical en estado no deformado

EL puente Riecito se encuentra ubicado en la Zona N° 4

$$\begin{aligned}
 \Delta &= 1.5d_t = 10.50 \\
 \delta &= 2 \cos^{-1}\left(\frac{\Delta}{B}\right) = 2.43 \\
 \frac{A_r}{A_{gross}} &= \frac{(\delta - \sin\delta)}{\pi} = 0.57 \\
 P_{cr(\Delta)} &= \frac{A_r}{A_{gross}} P_{cr(\Delta=0)} = 613.02 \text{ k}
 \end{aligned}$$

Tiene que cumplir lo siguiente

$$\frac{P_{cr(\Delta)}}{1.2P_{DL} + P_{SL}} \geq 1 \qquad = \qquad 1.71 \geq 1$$

Finalmente, esta última condición de estabilidad de la carga vertical en estado deformado, Pcr tiene que ser mayor o igual a uno, en nuestro caso si está cumpliendo.

Las dimensiones básicas del aislador serían los siguientes:

OD	31.00	Base
High	48.532	Altura
dL	3.43	Diam de núcleo de plomo

Este diseño si satisface los criterios de límite de corte, y relación de estabilidad de carga vertical en los estados deformados y no deformados

5.3.2.1.3 Verificación de diseño final del aislador con núcleo de plomo

Los factores mínimos de modificación de la propiedad según GSID son

$$\lambda_{min, Kd} = 1.0$$

$$\lambda_{min, Qd} = 1.0$$

La determinación de los factores de modificación de las propiedades del sistema debe incluir la consideración de los efectos de temperatura, envejecimiento y de velocidad de raspado.

Nuestro puente de acuerdo a la clasificación del GSID es un puente esencial entonces utilizaremos un factor de 0.75 para los siguientes cálculos.

$$\lambda_{max,a,Kd} = 1.1 \qquad \lambda_{max,a,Kd} = 1.075$$

$$\lambda_{max,a,Qd} = 1.1 \qquad \lambda_{max,a,Qd} = 1.075$$

$\lambda_{max,t,Kd} =$		$\lambda_{max,t,Kd} =$	1.075
$\lambda_{max,a,Qd} =$	1.1	$\lambda_{max,t,Qd} =$	1.300
	1.4	$\lambda_{max,scragg,Kd} =$	1.000
$\lambda_{max,scragg,Kd} =$	1.0	$\lambda_{max,scragg,Qd} =$	1.000
$\lambda_{max,scragg,Qd} =$	1.0		

Por lo tanto, los factores máximos de modificación general:

$\lambda_{max,Kd} =$	1.160
$\lambda_{max,Qd} =$	1.400

Finalmente obtenemos las propiedades del límite superior

Qd max =	14.78 k
Kd max =	2.51 k/in

Luego se realiza el diseño del aislador de núcleo de plomo para los pilares del Puente Riecito usando el mismo procedimiento previamente descrito, obteniendo los siguientes resultados:

· Resistencia característica requerida,	Qd =	81.73 k
· Requerido rigidez post-elástica,	Kd =	16.76 kips/in

Los datos principales para el diseño del aislador son los siguientes

$d_t =$	5.2511062 in
$P_{DL} =$	1852.00 k
$P_{LL} =$	247.97 k
$P_{SL} =$	205.92 k
$P_{WL} =$	0.28 k

Después de realizar los mismos cálculos desarrollados anteriormente y cumpliendo todas las condiciones de verificación de corte y de estabilidad de la carga vertical en estado deformado y no deformado, obtenemos las dimensiones básicas del aislador.

OD	54.00	Base
high	21.700	Altura
d _L	9.53	Diam de núcleo de plomo

Los factores mínimos de modificación de la propiedad son

$$\lambda_{min, Kd} = 1.0$$

$$\lambda_{min, Qd} = 1.0$$

La determinación de los factores de modificación de las propiedades del sistema debe incluir la consideración de los efectos de temperatura, envejecimiento y de velocidad de raspado.

Nuestro puente de acuerdo a la clasificación del GDSI es un puente esencial entonces utilizaremos un factor de 0.75 para los siguientes cálculos.

$\lambda_{max,a,Kd} =$	1.1	$\lambda_{max,a,Kd} =$	1.075
$\lambda_{max,a,Qd} =$	1.1	$\lambda_{max,a,Qd} =$	1.075
$\lambda_{max,t,Kd} =$	1.1	$\lambda_{max,t,Kd} =$	1.075
$\lambda_{max,a,Qd} =$	1.4	$\lambda_{max,t,Qd} =$	1.300
$\lambda_{max,scragg,Kd} =$	1.0	$\lambda_{max,scragg,Kd} =$	1.000
$\lambda_{max,scragg,Qd} =$	1.0	$\lambda_{max,scragg,Qd} =$	1.000

Finalmente obtenemos las propiedades del límite superior

$$Qd \text{ max} = 114.42 \text{ k}$$

$$Kd \text{ max} = 19.44 \text{ k}$$

5.3.2.2. Diseño de aislador con sistema de péndulo friccional

5.3.2.2.1 Dimensionamiento

a) Propiedades principales

· Resistencia característica requerida,	$Q_d =$	10.56 k
· Requerido rigidez post-elástico,	$K_d =$	2.17 kips/in
· Desplazamiento total de diseño	$d_t =$	5.25 in
	$P_{DL} =$	221.12 k
	$P_{LL} =$	15.50 k
	$P_{WL} =$	0.28 k

Radio de curvatura

$$R = \frac{P_{DL}}{K_d}$$

$R =$	102.13 in
$R =$	103 in

Coefficiente de fricción

$$\mu = \frac{Q_d}{P_{DL}}$$

$\mu =$	0.044
	4.41 %

Selección de material

Seleccionamos 15GF, de acuerdo al coeficiente de fricción

σ_c (psi)	6500
μ (%)	5.27%

Diámetro del disco

$$A_c = \frac{P_{DL}}{\sigma_c} = 284.92 \text{ in}^2$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 A_c}{\pi}} = \begin{array}{l} 19.05 \text{ in} \\ 20.00 \text{ in} \end{array}$$

Diámetro del aislador

Como nuestro puesto este en la zona sismica =

4

S, es dato de la zona donde se encuentra el puente =

1.5

$$\Delta = 1.5 (d_t) = 7.88 \text{ in}$$

$$L_{\text{chord}} = 2 (\Delta + d_d/2) = 35.75 \text{ in}$$

$$B = L_{\text{chord}} + 2s = 38.75 \text{ in}$$

$$\text{Redondeamos B} = 26.00 \text{ in}$$

Altura del aislador

$$h = \frac{L_{\text{chord}}^2}{8R} = 1.4395268 \text{ in}$$

Espesor de la garganta

Suponemos que la tension del rodamiento es seguro debajo del aislador

$$\sigma_{\text{bearing}} = 2 \text{ ksi}$$

$$A_b = \frac{P_{DL} + P_{LL}}{\sigma_{\text{bearing}}} = 1049.985 \text{ in}^2$$

$$d_b = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi}} = 36.56 \text{ in}$$

$$t = 0.5 (d_b - d_d) = 8.28 \text{ in}$$

$$\text{Redondeamos } t = 8.5 \text{ in}$$

Altura total

$$T_1 = h + t = 3.63 \text{ in}$$

Redondeamos T1 a 4 in, consideraremos T1 = T2 entonces la altura total del aislador:

$$H = T_1 + T_2 = 8 \text{ in}$$

En resumen, las dimensiones básicas del aislador son los siguientes:

$$\text{Diámetro total} = 26.00 \text{ in}$$

$$\text{Altura total} = 8 \text{ in}$$

$$\text{Radio de superficie cóncavo} = 103 \text{ in}$$

5.3.2.2 Verificación de diseño máximo y mínimo

Para un aislador de péndulo friccionante, el factor de modificación solo se aplica al Qd

$$\lambda_{min,Qd} = 1.0$$

$$\text{De acuerdo al tipo de puente el factor es} = 0.75$$

$$\lambda_{max,a,Qd} = 1.10 \qquad \lambda_{max,a,Qd} = 1.075$$

$$\lambda_{max,c,Qd} = 1.00 \qquad \lambda_{max,c,Qd} = 1.000$$

$$\lambda_{max,tr,Qd} = 1.20 \qquad \lambda_{max,tr,Qd} = 1.150$$

$$\lambda_{max,t,Qd} = 1.20 \qquad \lambda_{max,t,Qd} = 1.150$$

Por lo tanto, los factores máximos de modificación general

$$\lambda_{max, a} = 1.422$$

La propiedades del límite superior

$$Q_{d,max} = 15.01 \quad k$$
$$K_{d,max} = 2.17 \quad k/in$$

A continuación, procedemos a diseñar el aislador con péndulo friccional para los pilares

Las principales propiedades requeridas son las siguientes:

· Resistencia característica requerida,	$Q_d =$	81.73 k
· Requerido rigidez post-elástico,	$K_d =$	16.76 kips/in
· Desplazamiento total de diseño	$d_t =$	5.25 in
	$P_{DL} =$	1852.00 k
	$P_{LL} =$	247.97 k
	$P_{WL} =$	0.28 k

Realizamos el mismo procedimiento que utilizamos para diseñar el aislador de péndulo friccional para los estribos, calculamos radio de curvatura, diámetros del aislador, altura del aislador, espesor de la garganta, la altura total del aislador; y obtenemos los siguientes resultados:

Diámetro total	=	26.00 in
Altura total	=	8 in
Radio de superficie cóncavo	=	111 in

Finalmente realizamos una verificación de desempeño máximo y mínimo.

Finalmente obtenemos las propiedades de límite superior de K_{dmax} y Q_{dmax}

$$Q_{d,max} = 116.19 \quad k$$
$$K_{d,max} = 16.76 \quad k/in$$

CAPÍTULO VI

APLICACIÓN DE LOS AISLADORES SÍSMICOS AL PUENTE RIECITO

6.1 Resumen de rigidez de cada aislador

Obteniendo los últimos datos de la rigidez por unidad de aislador en cada apoyo, con los valores máximos Qd y Kd, como se muestra en la tabla N°25 a continuación, acto seguido es insertado en las propiedades de los apoyos tanto como en los estribos como en los pilares.

Tabla 25
Rigideces de aislador por apoyo

Kisol i (LRB) (kips/in)	Kisol i (FPS) (kips/in)
5.43909294	5.13803661
45.00562064	42.7200347
45.00562064	42.7200347
5.43909294	5.13803661

Fuente: Elaboración Propia

6.2 Comportamiento sísmico

A continuación, se procederá a realizar el análisis, trabajando de manera paralela con el modelamiento en el programa CSI Bridge, para poder obtener el comportamiento sísmico del puente Riecito, implementándole los dos tipos de aisladores

6.2.1 Comportamiento sísmico con aislador con núcleo de plomo

6.2.1.1. Máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal

Del modelamiento del aislador núcleo de plomo obtenemos el desplazamiento de la superestructura, como es en el eje longitudinal, se verifica el desplazamiento realizando un análisis en sismo en X y obtenemos el desplazamiento como se observa en la Figura N°37, con el valor de 4.4678 in

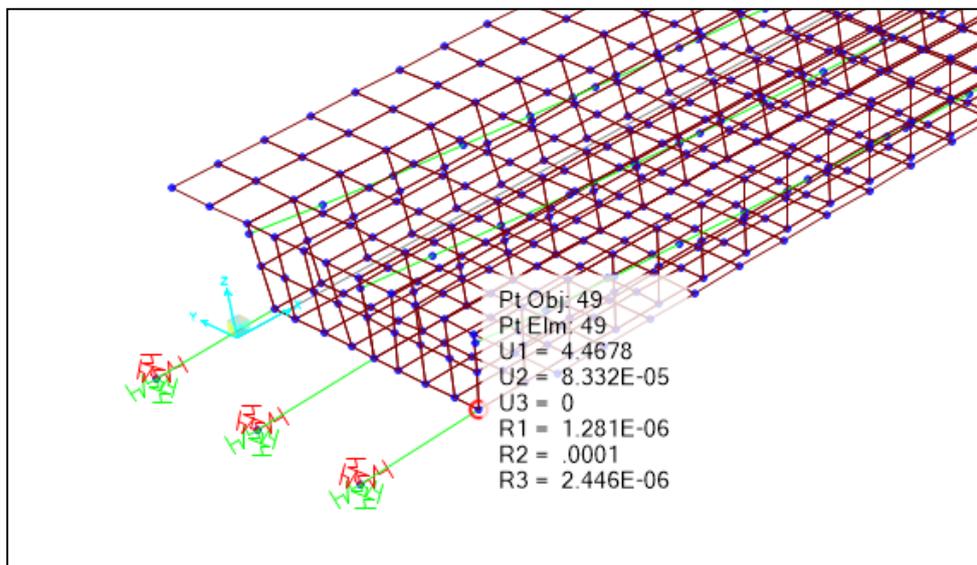


Figura 37. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido longitudinal al puente

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.2. Máximo desplazamiento de la superestructura transversal

Del modelamiento del aislador núcleo de plomo obtenemos el desplazamiento de la superestructura, como es en el eje transversal, se verifica el desplazamiento realizando un análisis en sismo en Y, obtenemos el desplazamiento como podemos observar en la figura N°38. En sentido transversal nos da un desplazamiento de 3.7579 in

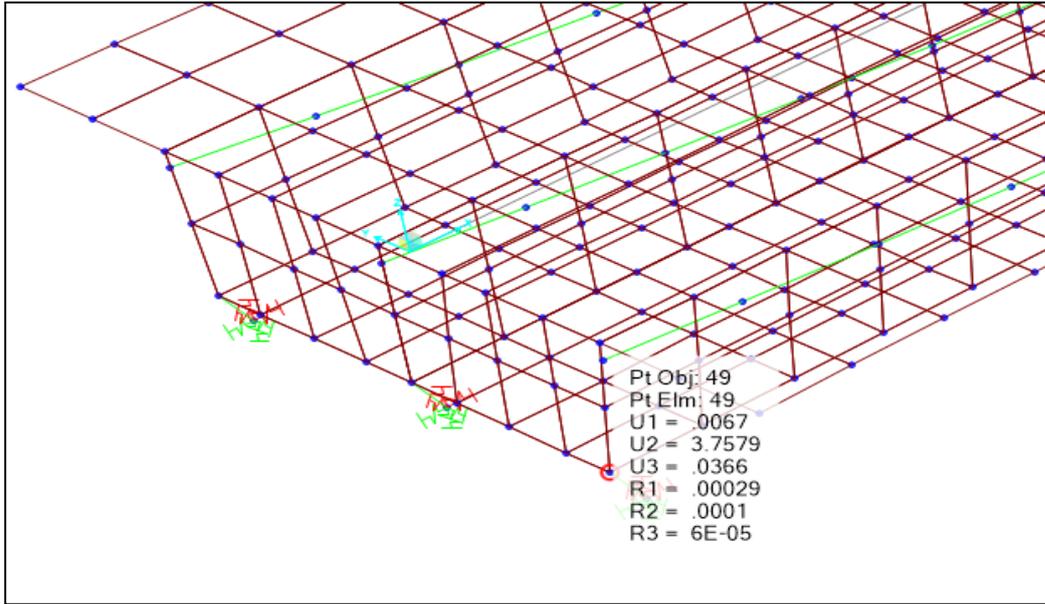


Figura 38. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido transversal al puente
Fuente: Elaboración propia

6.2.1.3. Máximo cortante en el pilar (longitudinal)

Del modelamiento del aislador de núcleo de plomo obtenemos el cortante máximo del pilar, como es en el eje longitudinal, se verifica las cortantes realizando un análisis en sismo en X Obteniendo un resultante de máximo cortante en el sentido longitudinal 506.65 k, así como indica la figura N°39

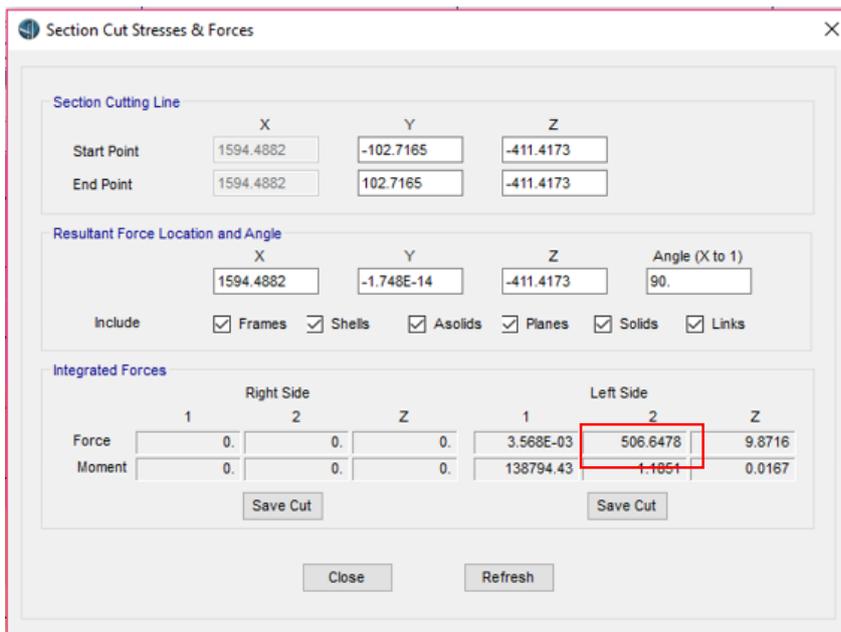


Figura 39. Máximo cortante en el pilar en sentido longitudinal al puente
Fuente: Elaboración propia

6.2.1.4. *Máximo cortante en el pilar (transversal)*

Del modelamiento del aislador de núcleo de plomo obtenemos el cortante máximo del pilar, como es en el eje longitudinal, se verifica las cortantes realizando un análisis en sismo en Y y fijándonos en el F2, así como se muestra en la Figura N°40

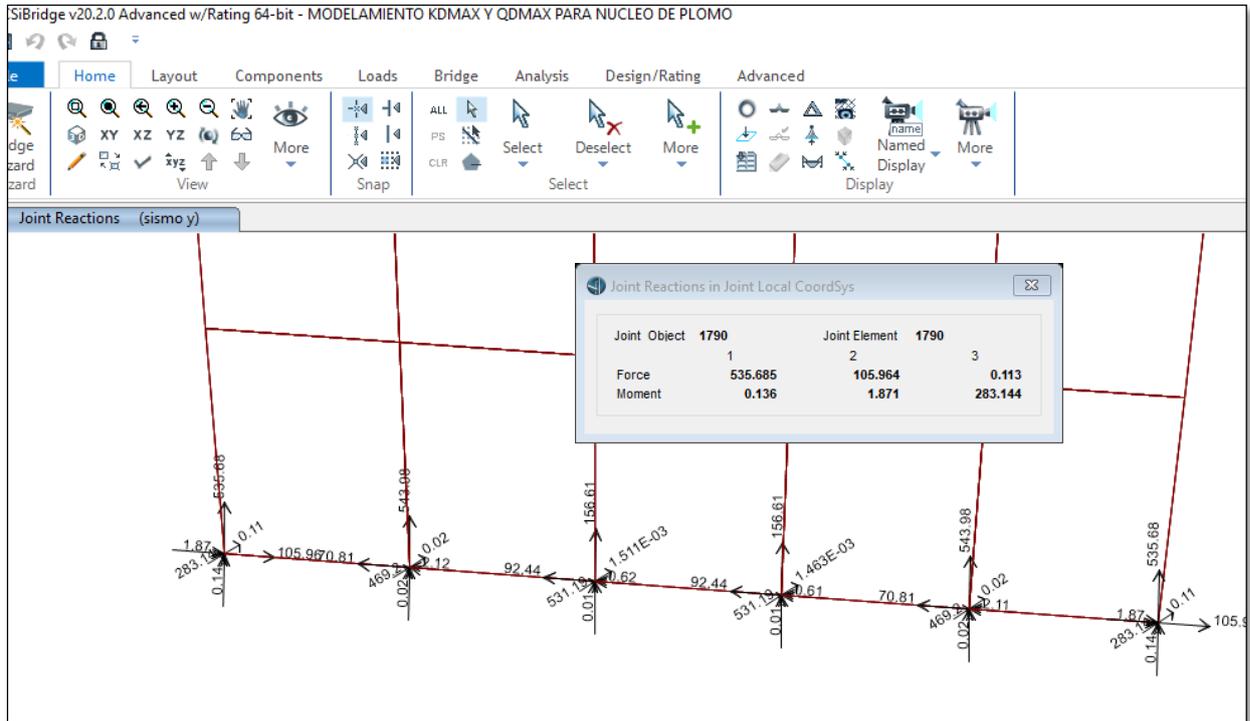


Figura 40. Máximo cortante en el pilar en sentido transversal al puente
Fuente: Elaboración propia

6.2.1.5. *Máximo cortante en el pilar (Resultante)*

La máxima cortante en el pilar es 668.182 k

6.2.1.6. *Momento máximo del pilar sobre eje transversal*

Del modelamiento del aislador de núcleo de plomo para calcular el máximo momento del pilar sobre el eje transversal, tenemos que realizar un análisis en sismo en X y realizar la sumatoria de todos los momentos M2 de cada pilar, teniendo un resultado de 138795.68 k.in como se puede observar en la Figura N°41

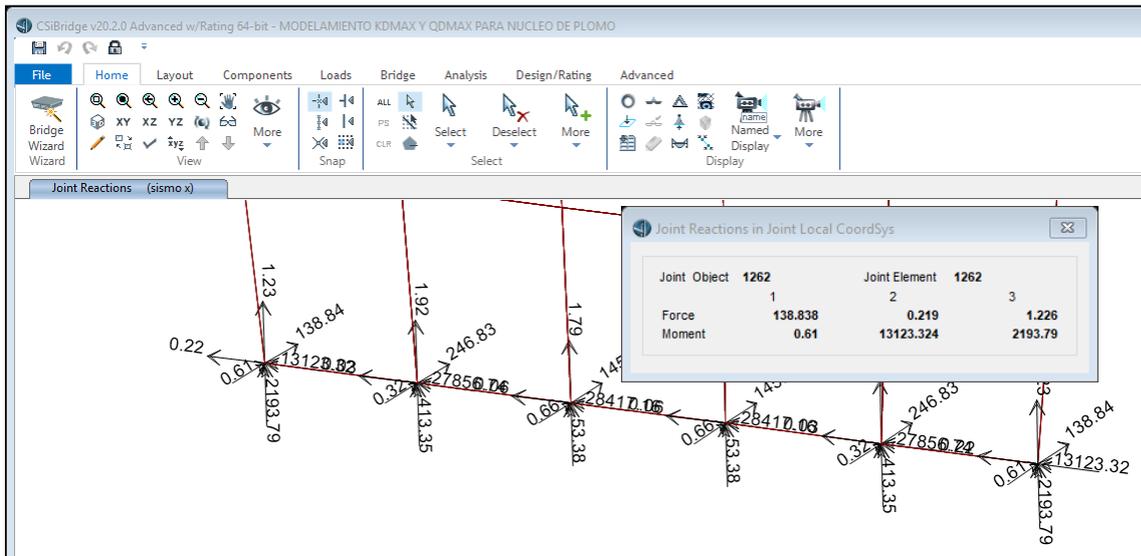


Figura 41. Máximo momento del pilar sobre eje transversal al puente

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.7. Momento máximo del pilar sobre eje longitudinal

Del modelamiento del aislador de núcleo de plomo para calcular el máximo momento del pilar sobre eje longitudinal, tenemos que realizar un análisis en sismo en Y, realizar la sumatoria de todos los momentos M1 de cada pilar, como se puede observar en la Figura N°42. El momento máximo del pilar sobre eje longitudinal es 186168.94 k.in

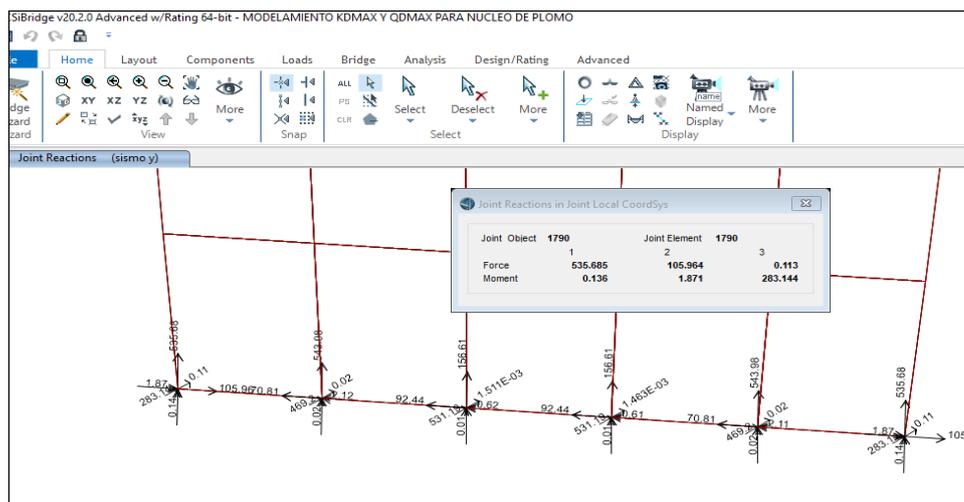


Figura 42. Máximo momento del pilar sobre eje longitudinal del puente

Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Comportamiento sísmico con aislador con sistema de péndulo friccional

6.2.2.1. Máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal

Del modelamiento del aislador de péndulo friccional obtenemos el desplazamiento de la superestructura, como es en el eje longitudinal, se verifica el desplazamiento realizando un análisis en sismo en X y obtenemos el desplazamiento como se observa en la Figura N°43.

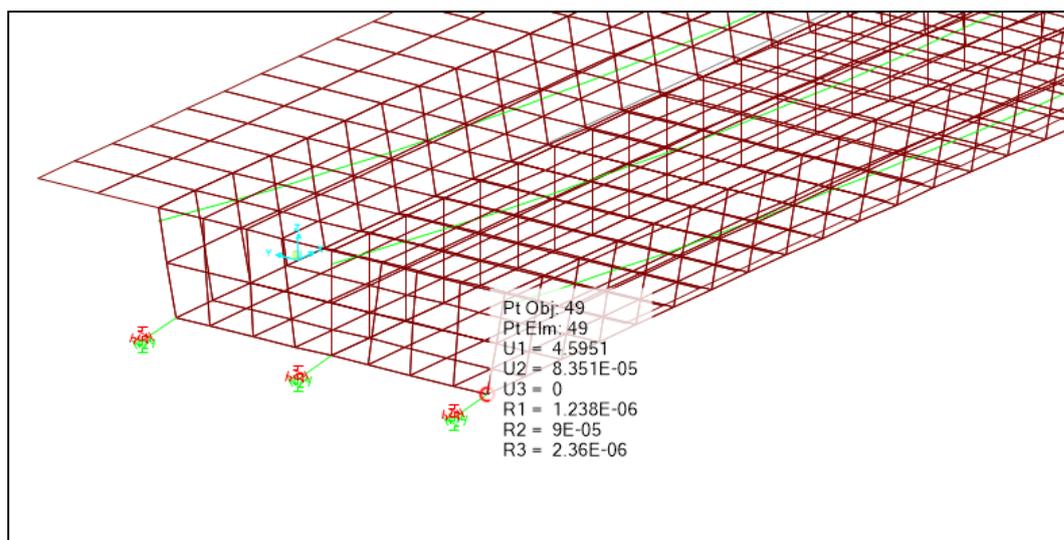


Figura 43. Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido longitudinal al puente
Fuente: Elaboración propia

En sentido longitudinal nos da un desplazamiento de 4.5951 in

6.2.2.2. Máximo desplazamiento de la superestructura transversal

Del modelamiento del aislador núcleo de péndulo friccional obtenemos el desplazamiento de la superestructura, como es en el eje transversal, se verifica el desplazamiento realizando un análisis en sismo en Y, obtenemos el desplazamiento como podemos observar en la figura N°44 En sentido transversal nos da un desplazamiento de 3.84 in

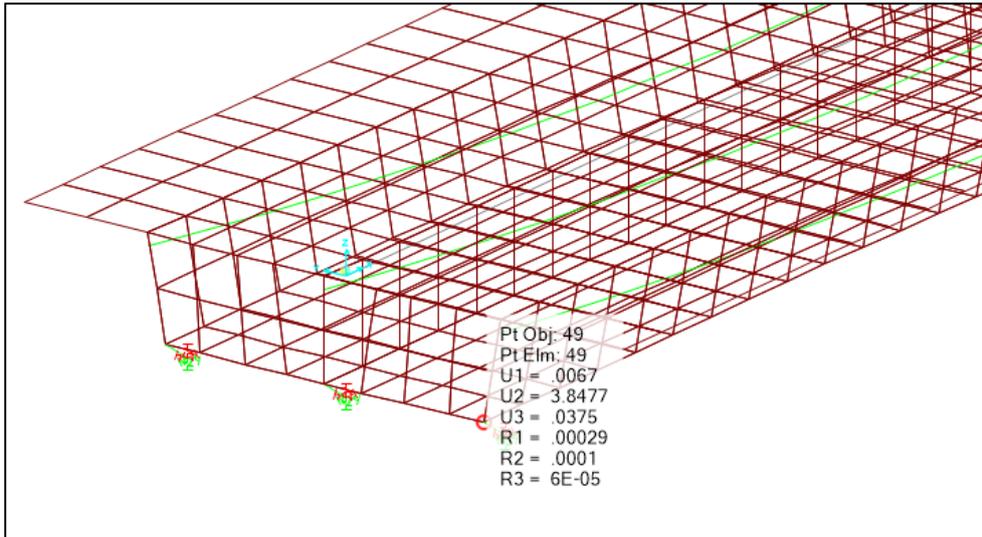


Figura 44.

Máximo desplazamiento de la superestructura en sentido transversal al puente
Fuente: Elaboración propia

6.2.2.3. Máximo cortante en el pilar longitudinal

Del modelamiento del aislador de péndulo friccional obtenemos el cortante máximo del pilar, como es en el eje longitudinal, se verifica las cortantes realizando un análisis en sismo en X obteniéndose como resultado el valor de 506.65 k, así como indica la figura N°45

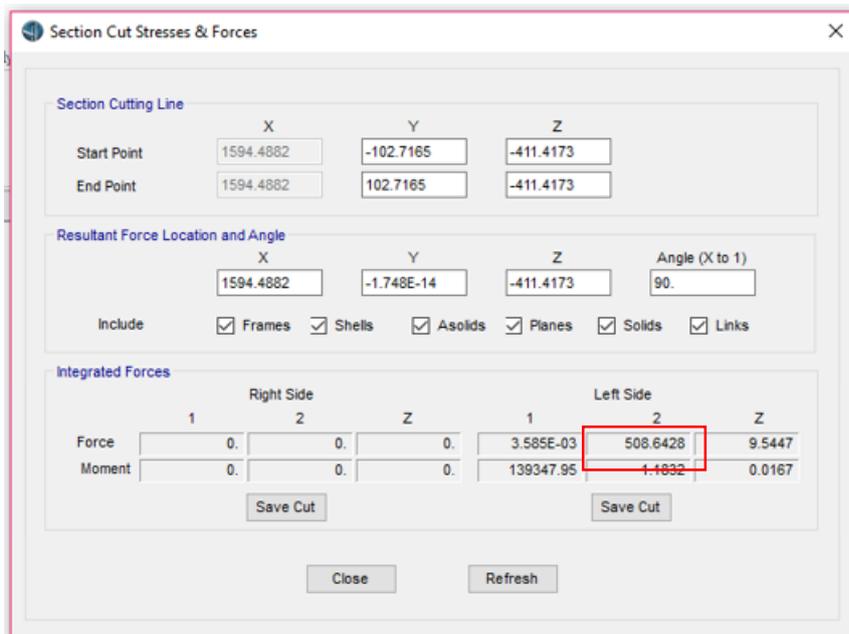


Figura 45. Máximo cortante en el pilar en sentido longitudinal al puente
Fuente: Elaboración propia

Obtenemos el máximo cortante en el pilar longitudinal 508.64 k

6.2.2.4. *Máximo cortante en el pilar transversal*

Del modelamiento del aislador de péndulo friccional obtenemos el cortante máximo del pilar, como es en el eje longitudinal, se verifica las cortantes realizando un análisis sísmico en Y, y fijándonos en el F2, así como se muestra en la Figura N°46

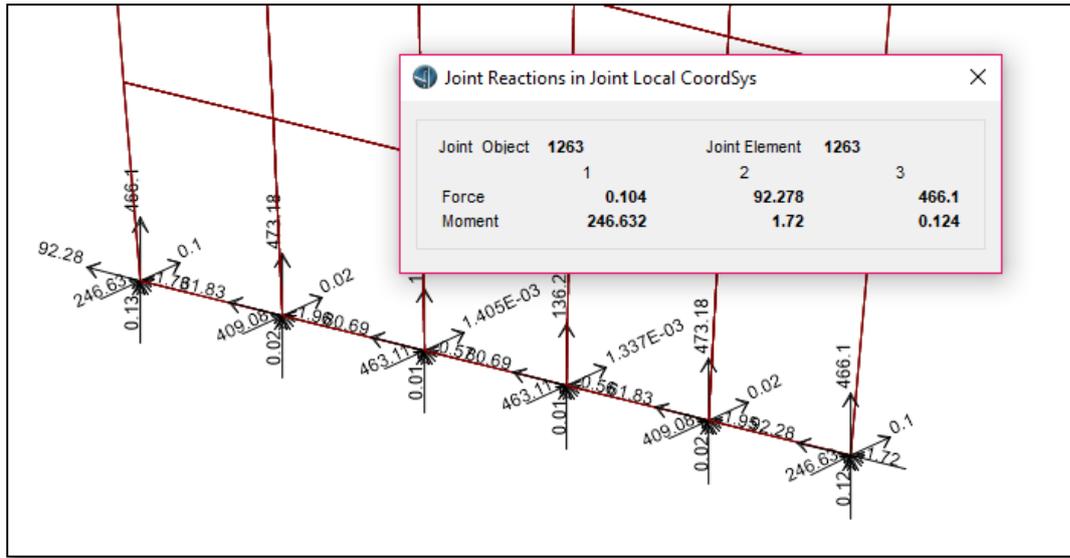


Figura 46. Máximo cortante en el pilar en sentido transversal al puente
Fuente: Elaboración propia

Finalmente obtenemos el máximo cortante en el pilar transversal 571.56 kip

6.2.2.5. *Máximo cortante en el pilar resultante*

La máxima cortante en el pilar es 680.108 k

6.2.2.6. *Momento máximo del pilar sobre eje transversal*

Del modelamiento del aislador de péndulo friccional para calcular el máximo momento del pilar sobre el eje longitudinal, tenemos que realizar un análisis sísmico en X y realizar la sumatoria de todos los momentos M2 de cada pilar, como se puede observar en la Figura N°47

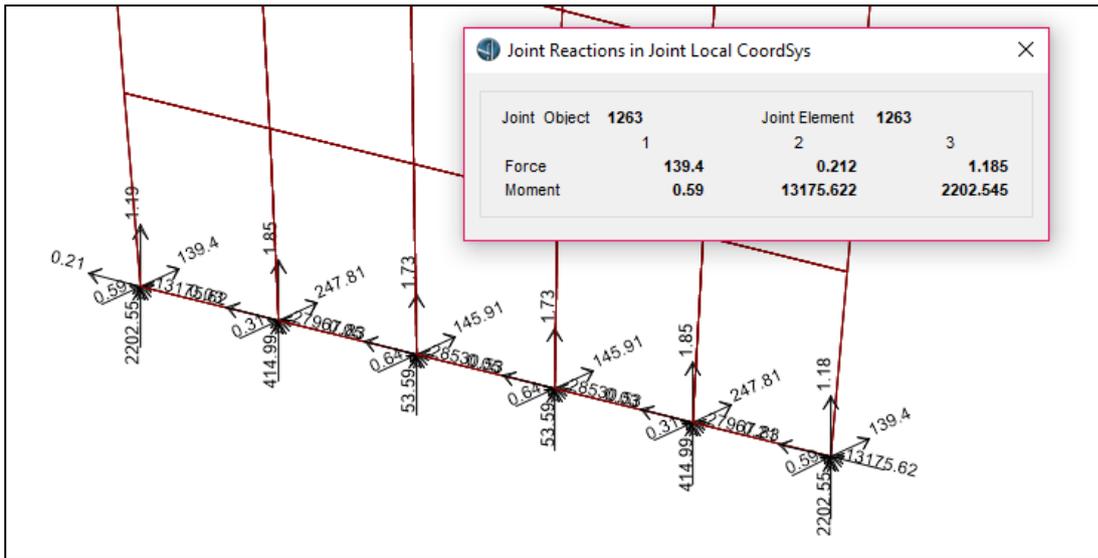


Figura 47. Máximo momento del pilar sobre eje transversal al puente
Fuente: Elaboración propia

Finalmente obtenemos el máximo momento del pilar sobre el eje transversal 139349.2 kip-in

6.2.2.7. Momento máximo del pilar sobre eje longitudinal

Del modelamiento del aislador de péndulo friccional para calcular el máximo momento del pilar sobre eje longitudinal, tenemos que realizar un análisis en sismo en Y y realizar la sumatoria de todos los momentos M1 de ambos pilares, como se puede observar en la Figura N°48 Finalmente obtenemos el máximo momento del pilar 197068.32 kft

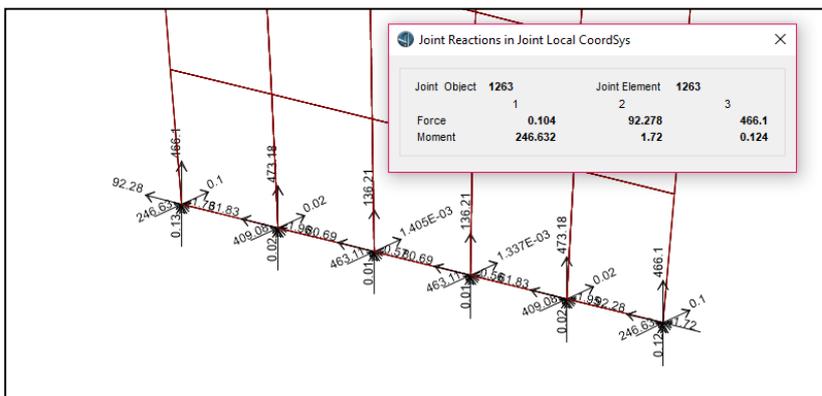


Figura 48. Máximo momento del pilar sobre eje longitudinal del puente
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VII

PRESENTACION Y COMPARACION DE RESULTADOS DE LOS AISLADORES SISMICOS

7.1 Resultados de la investigación

Finalmente, luego de realizar todos los pasos para el diseño del sistema de aisladores sísmicos de acuerdo a la norma Aashtho Guide Specifications for seismic isolation design 2014 y obtener resultados de cada tipo de aislador analizado; Obtenemos los siguientes resultados como se puede observar en la Tabla N°26y podemos ver las diferencias del comportamiento sísmico del Puente Riecito.

Ahora se compararán los valores del periodo para los 12 primeros modos de vibración del puente Riecito.

Tabla 26

Periodo fundamental del puente Riecito

TABLE: Modal Periods And Frequencies			
Péndulo friccionante		Núcleo de Plomo	
Modo	Periodo	Modo	Periodo
1	2.100216	1	2.05227
2	2.064205	2	2.010484
3	1.982192	3	1.931839
4	0.880063	4	0.879966
5	0.833709	5	0.831463
6	0.425805	6	0.425787
7	0.32956	7	0.329557
8	0.327617	8	0.327226
9	0.231919	9	0.231918
10	0.206677	10	0.206633
11	0.178311	11	0.17828
12	0.144689	12	0.144674

Fuente: Elaboración propia

Como podemos apreciar en la tabla N°27 el uso de aislador de péndulo friccional tiene mayor periodo fundamental de vibración que el aislador de núcleo de plomo.

7.2 Análisis y comparación de resultados

En la tabla N°27 tenemos el resumen de desempeño del puente Riecito, donde podemos apreciar las comparaciones entre los dos tipos aisladores que se están analizando, núcleo de plomo y el sistema de péndulo friccional

Podemos observar que el sistema de péndulo friccional genera un mayor desplazamiento de la súper estructura en el lado longitudinal y transversal

Tabla 27

Resumen y comparación de desempeño del puente

Puente Riecito	Núcleo de Plomo		Péndulo friccional	
Sismo X				
Máx. desplaz. de la superestructura longitudinal	4.47	in	4.60	in
Máx. cortante en el pilar (longitudinal)	506.65	k	508.64	k
Máx. momento en el pilar (transversal)	138795.68	k.in	139349.17	k.in
Sismo Y				
Máx. desplaz. de la superestructura transversal	3.76	in	3.85	in
Máx. cortante en el pilar (transversal)	538.44	k	571.56	k
Máx. cortante en el pilar (longitudinal)	186168.94	k.in	197068.32	k.in
Resultante				
Maximo desplazamiento	5.6	in	5.75	k.in
Maximo cortante en el pilar	668.18	k	680.11	k.in
Momento máximo en el pilar	194646.37	k.in	198469.67	k.in

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a las fuerzas que se generan en comparación de ambos tipos de aisladores, obtiene mayor fuerza cortante y momento en el aislador de tipo deslizante, sistema de péndulo friccional.

Según las investigaciones realizadas en las empresas proveedoras en Chile de aisladores sísmicos, el aislador con sistema de péndulo friccional es de menor costo en comparación con el aislador con núcleo de plomo y su fabricación es más rápida.

En la tabla N°28 presentada a continuación, se puede observar las variaciones porcentuales del comportamiento sísmico entre ambos tipos de aisladores sísmicos, contestando así los objetivos de nuestra investigación

Tabla 28

Variación porcentual entre resultados

Puente Riecito	Núcleo de Plomo	Péndulo Friccional	Diferencia porcentual
Máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal	4.47k	4.60k	2.91%
Máximo desplazamiento de la superestructura transversal	3.76k	3.85k	2.39%
Máximo desplazamiento de la superestructura (resultante)	5.60k	5.75k	2.68%
Máximo cortante en el pilar (longitudinal)	506.65 k	508.64 k	0.39%
Máximo cortante en el pilar (transversal)	538.44k	571.56k	6.15%
Máximo Cortante en el pilar(resultante)	668.182k	680.108k	1.78%
Momento máximo del pilar (sobre eje long.)	186168.94k.in	197068.32 k.in	5.85%
Momento máximo del pilar (sobre eje transv)	138795.68 k.in	139349.17 k.in	0.40%
Momento máximo del pilar (resultante)	194646.37 k.in	198469.67 k.in	1.96%

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, el máximo desplazamiento de la superestructura longitudinal con el uso de aisladores sísmicos elastómeros con núcleo de plomo es 2.91% menor que con el uso de aisladores con sistema de péndulo friccional, es decir que el desplazamiento con uso de aisladores con núcleo de plomo es de 4.47in a 4.60 in con péndulo friccional , en cuanto a la dirección transversal, con el uso de aislador elastómero con núcleo de plomo arroja una diferencia porcentual de 2.39%, con respecto al uso de aisladores con sistema de péndulo friccional.

Con respecto a los máximos cortantes en la dirección longitudinal, con el uso de aisladores sísmicos con núcleo de plomo varia porcentualmente solo el 0.39% con respecto al uso de aisladores sísmicos con sistema de péndulo friccional, mientras que en la dirección transversal se reduce en un 6.15%.

Finalmente, con los momentos máximos en el pilar sobre el eje longitudinal, con el uso de aisladores sísmicos con núcleo de plomo es 5.85% menor que el momento máximo pilar sobre el eje longitudinal con el uso de aislador sísmico con sistema de péndulo friccional, y en cuanto al momento sobre el eje transversal la diferencia porcentual es de 0.40%.

Cabe mencionar que los valores obtenidos en el modelamiento del puente, se tuvo la siguiente consideración según la guía de especificaciones de diseño de aisladores sísmicos de AASHTO, donde indica que se debe realizar el análisis para dos casos, para el desplazamiento se usaran los valores mínimos de Kd y Qd, y para las fuerzas máximas, los valores máximos de Kd y Qd

7.3 Contrastación de hipótesis

Tabla 29

Comportamiento sísmico resultante con uso de aisladores sísmicos tipo LRB y FPS

Puente Riecito	Núcleo de Plomo	Péndulo Friccional	Diferencia porcentual
Máximo desplazamiento de la superestructura (resultante)	5.60k	5.75k	2.68%
Máximo Cortante en el pilar(resultante)	668.182k	680.11k	1.78%
Momento máximo del pilar (resultante)	194646.37k.in	198469.67k.in	1.96%

Fuente: Elaboración Propia

- a) Con respecto a la primera hipótesis específica, que indica que el desplazamiento en el aislador tipo LRB es 10% mayor al que se produce en el tipo deslizante FPS, vendría a ser incorrecto, ya que sucede lo contrario el máximo desplazamiento que se produce en el aislador con núcleo de plomo es 2.68% menor en comparación al aislador con sistema de péndulo friccional, ver tabla N°29, estos valores se calculan por los desplazamientos en sentido longitudinal y transversal arrojados por el modelamiento en Csi Bridge, y adoptando como resultante el valor del desplazamiento longitudinal mas el 30% del valor del desplazamiento transversal.

- b) Con respecto a la segunda hipótesis específica, que indica que las fuerzas de la estructura con el uso del aislador tipo LRB es 5% mayor al que se produce en el tipo deslizando FPS, vendría a ser incorrecto, ya que la fuerza cortante máxima resultante con el uso del núcleo de plomo es 1.78% menor que el máximo cortante resultante que con el uso de aislador con sistema de péndulo friccional, y en el caso del momento máximo resultante es 1.96% menor con el uso de aisladores sísmicos elastómeros con núcleo de plomo, que con el uso de aisladores sísmicos con sistema de péndulo friccional, ver tabla N°29, estos valores se calculan por los cortantes en sentido longitudinal y transversal arrojados por el modelamiento en Csi Bridge, y adoptando como resultante el valor del cortante longitudinal más el 30% del valor del cortante transversal.
- c) En cuanto a la comparación entre ambos tipos de aisladores, como objetivo final de esta investigación, son similares las respuestas sísmicas obtenidas, sin embargo, el núcleo de plomo tiene bajos porcentajes a su favor en comparación del aislador de péndulo friccional, sin embargo es sugerencia ampliar el enfoque para dar una respuesta como mejor alternativa entre ambas opciones, para aplicarlos en un caso real, ya que según los cálculos presentados en la presente investigación, se llega a un dimensionamiento en ambos tipos de aisladores resumidas de la siguiente manera:

Para el aislador con Núcleo de plomo:

Estribo:	Pilar
Base: 31 in	Base:54 in
Altura: 48.53 in	Altura: 21.7 in
Diámetro de núcleo de plomo:	Diámetro de núcleo de plomo:
3.43 in	9.53 in

Para el aislador con sistema de péndulo friccional:

Estribo:	Pilar
Diametro total: 26 in	Base:26 in
Altura: 8 in	Altura: 8 in
Radio de superficie concavo:	Diámetro de núcleo de plomo:
103 in	111 in

Con estas características y dimensiones de los aisladores en cada apoyo, es conveniente analizarlos económicamente de modo que se pueda tener una comparación de costo-beneficio, se tiene información de que el aislador con sistema de pendulo friccional es menos costoso que el aislador con núcleo de plomo. Sin embargo, en esta investigación el enfoque es netamente un comportamiento sísmico, por tanto la alternativa a favor, es el aislador elastomérico con núcleo de plomo

CONCLUSIONES

- 1) Se concluye del primer objetivo específico, denotado el capítulo VII, y como se observa y presenta en la tabla N°29 que el uso de aislador con núcleo de plomo tipo LRB genera menores desplazamientos en la superestructura en un 2.91 % en comparación con el uso de aisladores con sistema de péndulo friccional, es decir según el modelamiento en CSI bridge arroja un desplazamiento máximo resultante de 5.75 in con el uso de aisladores con sistema de péndulo friccional, y un 5.60 in con el uso de aislador con núcleo de plomo
- 2) La fuerza cortante máxima resultante en el pilar de la estructura del puente Riecito, con el uso del aislador con núcleo de plomo es de 668.18 k mientras que con el uso de aislador con sistema de péndulo friccional es de 680.11 k, es decir que la fuerza máxima cortante resultante en el pilar con el uso de aislador con núcleo de plomo es 1.78% menor que la estructura con el uso de aislador sísmico con sistema de péndulo friccional
- 3) El momento máximo resultante en el pilar de la estructura del puente Riecito, con el uso del aislador con núcleo de plomo es de 194646.37 k .in mientras que con el uso de aislador con sistema de péndulo friccional es de 198469.67 k.in, es decir que el momento máximo resultante en el pilar con el uso de aislador con núcleo de plomo es 1.96% veces menor que la estructura con el uso de aislador sísmico con sistema de péndulo fricción
- 4) Tanto la conclusión b y c, responden nuestro objetivo específico N°2, denotado en el capítulo IV, dando como resultado a favor el uso de aisladores sísmicos elastómeros con núcleo de plomo
- 5) Se puede apreciar en la tabla N°26 que los valores de los periodos fundamentales de la estructura con el uso de aisladores sísmicos del tipo deslizantes, son mayores a los del tipo elastomérico con núcleo de plomo

6) En cuanto al enfoque de costo, según la empresa Proveedora Chilena SISMICA, los aisladores del tipo deslizante con sistema de péndulo friccional tienen menor costo que los del tipo elastomérico, y tiene una mayor rapidez en cuanto a la fabricación, cabe resaltar que la altura del aislador es menor que la del elastomérico con núcleo de plomo, por tanto es necesario tener en cuenta las dimensiones del aislador para cumplir los requerimientos mínimos de resistencia de diseño del puente y el costo que impacte en el mismo.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda que para el uso de esta investigación se haga de acuerdo a la realidad del puente, es decir el tipo de puente, la ubicación para obtener los parámetros reales.
- 2) Se recomienda que se realice una evaluación económica con proveedores nacionales para la consideración de los dispositivos para la colocación de los mismos ya que las respuestas sísmicas tienen diferencia porcentual mínima.
- 3) Actualmente el Perú no tiene una publicación con respecto al tema de la investigación, para el uso de aisladores sísmicos en puentes, es necesario recurrir a la guía de especificaciones de diseño con aislamiento sísmico publicado por AASHTO
- 4) Para lograr decidir entre ambos tipos de aisladores sísmicos y aplicarlos en un puente, se recomienda realizar una cotización con el proveedor según las dimensiones diseñadas para los requerimientos del mismo, y analizarlo económica y funcionalmente

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2014) *Diseño de aisladores FPS de la primera y segunda generación y de aisladores elastómeros con núcleo de plomo*, (Tesis Pre grado), Universidad de Búfalo, Nueva York, Estados Unidos
- Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación*. Caracas, Venezuela.
- Buckle I.G (2016). *Seismic Isolation of Highway Bridges, Reporte N° MCEER-06-SP07, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Bufalo, New York, USA.*
- Gómez, M. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Cordoba, Argentina.
- Hernández, R. Fernández, C. Baptista, L. (2010). *Metodología de la investigación*. México D.F, México.
- Huerta, C., (2017). *Comparación del comportamiento sísmico de un puente convencional y un puente de aisladores*. Lima, Perú. (Tesis de Pre-grado), Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú
- Liñan, R. y Carrasco Z. (2015). *Análisis sísmico entre los sistemas de concreto armado y con aislamiento sísmico en la base para un edificio de 5 pisos*. (Tesis de de Pre-Grado), Universidad Privada de Trujillo. Lima, Perú.
- Martínez, A. y Melgar, C. (2015). *Análisis, comportamiento y diseño de edificaciones con aisladores de péndulo friccional*. (Tesis de Pre-Grado), Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Minchan, M., (2016). *Comparación de la respuesta sísmica de puentes viga losa, con y sin aisladores sísmicos*, en Cajamarca, Perú.

- Murat, E. (2015) *Investigación sobre la influencia de los parámetros de diseño sobre la respuesta de los puentes sísmicamente aislados con el sistema de péndulo de fricción* (Investigación) Lima, Perú.
- Ramírez, O., (1999). *Determinación de la vulnerabilidad sísmica en estructuras de puentes*. (Tesis Doctoral), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sandeep, K., ArunaKanthi, E., (2018). *Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions*. Lima, Perú.
- Tamayo, Mario, (2004). *El proceso de la investigación científica*. México D.F, México.
- Uliarte, P, (2014). *Análisis y diseño estructural de un puente carretero* (Tesis Pre Grado), Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.