



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

**DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES CARRETEROS CON
BASE AISLADA**

TESIS Y EXAMEN PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOSE IVAN DURAN ABURTO

ASESOR:

DR. DARÍO RIVERA VARGAS

**SANTA CRUZ ACATLÁN, NAUCALPAN, ESTADO DE MÉXICO (FES
ACATLÁN), 2024**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres Elizabeth y Juan, quienes todos los días me brindan la fuerza para seguir adelante.

A mis hermanos Liz y Juan Daniel, quienes han forjado gran parte de mi carácter y son siempre un motor que me impulsa e inspira.

A Quetita †, quien estará por siempre en mi mente y corazón

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Elizabeth Aburto y Juan Durán, a quienes agradezco su amor, su esfuerzo y el infinito apoyo brindado. Por haberme forjado como persona y respaldar siempre todas mis decisiones, todo lo que he logrado ha sido por ustedes y para ustedes. Doy gracias a la vida por haberme brindado la dicha de tenerlos como padres, es un orgullo ser su hijo. Han sido y serán siempre mi más grande motivo para seguir adelante.

A mis hermanos Liz y Juan Daniel, por su infinito cariño y por ser quienes han definido gran parte de mi carácter, no sería la persona que soy sin esas sonrisas y esos calurosos abrazos que siempre me llenan de energía. Ustedes son mi más grande inspiración.

A toda la familia Aburto, por acogerme durante toda mi vida universitaria, brindarme un techo, comida y trabajo; por siempre hacer todo lo posible para que me sintiera como en casa, por su esfuerzo, sus desvelos a causa mía y por siempre preocuparse porque yo estuviera bien. Sin el apoyo de todos ustedes, nada de esto hubiera sido posible, tengo una deuda de por vida con ustedes que jamás podré saldar, por todo eso, gracias.

A mis amigos Alhelí y Lalo, por su entrañable amistad durante toda la carrera, por los desvelos juntos, por todos esos buenos y malos momentos que pasamos. La carrera no hubiera sido la misma sin ustedes dos a mi lado. Gracias, Lalo, por ser mi soporte en los momentos difíciles, por tu paciencia y por convertirte en mi familia, como siempre lo he dicho, eres un hermano para mí. Gracias, Alhelí, por enseñarme de la vida, por tus consejos y ser esa persona incondicional en todo momento.

A mi asesor de tesis, Doctor Darío Rivera Vargas, por su compromiso, paciencia y dedicación durante el proceso de desarrollo del presente trabajo. Gracias por todos sus conocimientos transmitidos y por ser una parte fundamental en el desarrollo de la ingeniería en nuestro país. Mi más grande admiración hacia usted no solo como profesional, sino como persona.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional que me ha brindado. Me comprometo a poner siempre su nombre en alto, portando con orgullo sus colores.

Gracias a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA) por el apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo de investigación como parte del proyecto PAPIIT IT101921 "Enfoque multivariado para mejorar la estimación del riesgo sísmico de las construcciones"

Contenido

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Objetivo y alcance de la investigación	12
1.3. Contenido	12
2. DAÑOS OBSERVADOS EN PUENTES POR SISMO.....	14
2.1. México.....	14
2.1.1. Sismo 19-sep-1985.....	14
2.1.2. Sismo 09-oct-1995	15
2.1.3. Sismo 21-ene-2003.....	16
2.1.4. Sismo 04-abril-2010.....	17
2.1.5. Sismos de septiembre de 2017	18
2.1.6. Tabla resumen “Daños por sismos en México”	21
2.2. Otras partes del mundo.....	22
2.2.1. Loma Prieta, 17-oct-1989.....	22
2.2.2. Northridge, 17-ene-1994	23
2.2.3. Kobe, 19-ene-1995	24
2.2.4. Wenchuan, 12-may-2008	25
2.2.4. Chile, 27-feb-2010	26
3. CARACTERISTICAS SISMOLÓGICAS DE LA COSTA DEL PACIFICO MEXICANO	28
3.1. Sismos históricos de subducción.....	28
3.2. Conceptos básicos de sismología	30
3.2.1. Escalas de intensidad y magnitud.....	32
3.2. Sismicidad en México	34
3.3. Sismos de Subducción.....	35
4. DISEÑO DE PUENTES SÍSMICAMENTE AISLADOS.....	39
4.1. Conceptos básicos de aislamiento sísmico.....	39
4.2. Tipos de aisladores sísmicos	43
4.3. Bondades del aislamiento sísmico.....	46
4.4. Parámetros de diseño de Aisladores elastoméricos.....	48
4.5. Métodos de análisis para diseño de aisladores	55
5. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO	58
5.1. Criterios básicos para el diseño sísmico de puentes con base aislada	58

5.2 Descripción del procedimiento de diseño	61
5.2.1. Predimensionamiento del puente y periodo fundamental con base fija (T_f)	61
5.2.2. Identificación del periodo pico en espectros de sitio (T_p) o periodos característicos en espectros de diseño (T_a, T_b)	63
5.2.3. Toma de decisión sobre el uso de aisladores de base	63
5.2.4. Diseño de los aisladores de base	67
5.2.5. Modelo y análisis sísmico de la estructura con aisladores de base	77
5.2.6. Revisión del cumplimiento de los objetivos de diseño basado en desempeño	79
5.2.7. Diseño y detallado de los elementos estructurales del puente	79
5.2.8. Planos, especificaciones y recomendaciones	79
5.3 Ejemplo de aplicación	82
5.3.1. Descripción del proyecto	82
5.3.2 Aplicación del procedimiento de diseño	90
5.3.3 Diseño final	99
5.4. Implicaciones para la práctica de diseño en puentes	110
CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS	113
ANEXOS	118
Anexo 1. Espectros de desplazamiento y aceleración absoluta	118
Anexo 2. Elementos tipo link en el programa SAP 2000	125
Anexo 3. Espectros de diseño modificado, espectro de diseño reducido y espectro de desplazamiento para ejemplo de aplicación	127

Índice de Figuras

Figura 2.1 Falla en columna por pandeo del acero de refuerzo y fractura del concreto	15
Figura 2.2 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente de la Isla Cayacal.	15
Figura 2.3 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Coahuayana	16
Figura 2.4 Falla en topes sísmicos y desplazamiento relativos en pilas (Alcocer et al., 2003)	17
Figura 2.5 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Manzanillo	17
Figura 2.6 Falla en topes sísmicos (Lara, 2013)	18
Figura 2.7 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Mexicali-Tijuana.	18
Figura 2.8 Colapso de superestructura (Twitter @PoliciaFedMx)	19
Figura 2.9 Distancia de los epicentros a zona de afectación del puente Ixtaltepec	19
Figura 2.10 Distancia de los epicentros a zona de afectación del puente La Ventosa.	20

Figura 2.11 Colapso total de puente.....	21
Figura 2.12 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Ing, Ricardo Bahena Brito.....	21
Figura 2.13 Falla en tableros superior e inferior del puente de la Bahía Oakland- San Francisco, Sismo de Loma Prieta, 1989 (Nakata, <i>et al.</i> , 1999).....	22
Figura 2.14 Distancia del epicentro a zona de afectación del Puente de la Bahía San Francisco – Oakland.	23
Figura 2.15 Falla por pérdida de apoyos y movimiento de traslación y rotación de estribos y diafragmas.....	23
Figura 2.16 Distancia del epicentro a zona de afectación del Puente Gavin Canyon.	24
Figura 2.17 Falla por cortante en columnas.	24
Figura 2.18 Distancia del epicentro a zona de afectación del Viaducto Fukae.....	25
Figura 2.19 Colapso del puente Baihwa (Lin <i>et al.</i> , 2010).	26
Figura 2.20 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Baihwa.....	26
Figura 2.21 Colapso del puente Autopista Vespucio Norte.	27
Figura 2.22 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Autopista Vespucio Norte.	27
Figura 3.1. Propagación de ondas sísmicas. Fuente: SGM	31
Figura 3.2. Principales placas tectónicas y su tipo de límite, que afectan la República Mexicana. Sismos de profundidad intermedia (azul) y someros (anaranjado). (Sánchez, 2015)	35
Figura 3.3: Zona de subducción. Fuente: Servicio Geológico Mexicano	36
Figura 3.4: Brecha de Guerrero y sismos históricos cercanos. Fuente: SSN, UNAM	37
Figura 3.5: Ubicación de las brechas de Guerrero y Michoacán. Fuente: SSN, UNAM, 1982.....	38
Figura 4.1: Parámetros del sistema aislado de dos grados de libertad.	40
Figura 4.2: Desplazamientos en estructura con y sin aislamiento sísmico.....	42
Figura 4.3. Esquema de aislador elastomérico (Fuente: MAGEBA)	44
Figura 4.4. Esquema de aislador elastomérico con núcleo de plomo. Fuente: (Fuente: MAGEBA)	44
Figura 4.5. Esquema de aislador de deslizamiento. Obtenida de: http://dspace.ucuenca.edu	45
Figura 4.6. Respuesta sísmica de un puente sin aisladores y con aisladores.....	47
Figura 4.7 Área efectiva a la compresión de aisladores HRB (CFE, 2015).....	51
Figura 4.8 Ciclo histerético de un aislador tipo LRB.....	54
Figura 5.1 Procedimiento de diseño sísmico de puentes con base aislada.....	62
Figura 5.2. Viabilidad del uso de aisladores en puentes en función de los valores T_p y T_f , cuando se emplea un espectro específico de sitio.	64
Figura 5.3. Viabilidad del uso de aisladores en puentes en función de los valores T_f y T_a y T_b , cuando se emplea un espectro regional de diseño sísmico.	65
Figura 5.4. Desplazamiento en la estructura del puente aislado.....	68
Por lo anterior, el periodo del sistema con aislamiento (T_{sa}) se puede expresar como:	68

Figura 5.5. Diagrama de un ciclo de histéresis para un aislador con núcleo de plomo.....	70
Figura 5.6. Área de traslape del apoyo desplazado para un aislador circular.	72
Figura 5.7. Espectro de respuesta modificado para considerar el amortiguamiento equivalente del sistema aislado.	78
Figura 5.8. Plano sobre las especificaciones técnicas de un aislador de base.	81
Figura 5.9 Sección longitudinal del puente.....	82
Figura 5.10: Espectro de aceleración absoluta para el registro de la estación Salina Cruz.....	85
Figura 5.11: Espectro de diseño transparente para Salina Cruz, Oaxaca.	86
Figura 5.12. Esquema general del modelo estructural sin aislamiento.	87
Figura 5.13. Conexión de elementos estructurales.....	87
Figura 5.14: Primera forma modal $T_A = 0.565s$	89
Figura 5.15: Segunda forma modal $T_A = 0.558s$	89
Figura 5.16: Tercera forma modal $T_A = 0.548s$	90
Figura 5.17: Espectro de desplazamiento con amortiguamiento del 26%.....	93
Figura 5.18. Elementos de modelo sísmicamente aislado.....	103
Figura 5.19: Primera forma modal $T_B = 1.595s$	104
Figura 5.20: Segunda forma modal $T_A = 1.593s$	105
Figura 5.21: Tercera forma modal $T_A = 1.589s$	105
Figura 5.22: Diagrama de interacción de columna sin aislamiento sísmico.....	107
Figura 5.23: Detalle de refuerzo columna sin aislamiento sísmico.....	108
Figura 5.24: Diagrama de interacción de columna con aislamiento sísmico.....	109
Figura 5.25: Detalle de refuerzo de columna con aislamiento sísmico.....	109
Figura A1 Registro sísmico Estación Jamiltepec, Oaxaca. 30/09/1999.....	119
Figura A2 Espectro de aceleración absoluta, Jamiltepec.....	119
Figura A3 Espectro de desplazamiento, Jamiltepec.....	120
Figura A4 Registro sísmico Estación Salina Cruz, Oaxaca. 08/09/2017.....	121
Figura A5 Espectro de aceleración absoluta, Salina Cruz.....	122
Figura A6 Espectro de desplazamiento, Salina Cruz.....	122
Figura A7 Registro sísmico Estación Tehuacán, Puebla. 19/09/2017.....	123
Figura A8 Espectro de aceleración absoluta, Tehuacán.....	124
Figura A9 Espectro de desplazamiento, Tehuacán.....	124
Figura A10 Selección del tipo de elemento link.....	125
Figura A11 Propiedades del aislador en las diferentes direcciones de análisis.....	126
Figura A12 Propiedades lineales y no lineales de cada dirección de análisis.....	126
Figura A13 Espectro de diseño modificado.....	127

Figura A14 Espectro modificado por amortiguamiento del sistema de aisladores (26.77%)	128
Figura A15 Espectro de diseño reducido	129
Figura A16 Espectro de desplazamiento	130

Índice de Tablas

Tabla 1: Daños por sismos de fuente cercana en puentes.	22
Tabla 2: Sismos históricos de subducción interpretados sismológicamente por Zúñiga <i>et al.</i> (1997)	29
Tabla 3: Sismos de subducción en el periodo instrumental (Zúñiga <i>et al.</i> , 1997) (Servicio Sismológico Nacional)	30
Tabla 4: Últimos eventos registrados en la brecha de Guerrero.....	37
Tabla 5. Comparación de parámetros entre estructuras con base fija y con aisladores de base (Gomez, 2007).	41
Tabla 6. Definición de los niveles de desempeño sísmico en puentes.	60
Tabla 7. Características de aisladores elastoméricos de base, según diversos fabricantes.....	66
Tabla 8. Proceso de cálculo en las iteraciones	75
Tabla 9. Propiedades de los aisladores a utilizar en el modelo matemático de análisis.....	77
Tabla 10 Cargas aplicadas al modelo de cálculo del puente	83
Tabla 11: Registros sísmicos para análisis sísmico. (Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería, UNAM)	84
Tabla 12: Datos de generación del espectro de pseudoaceleración.....	85
Tabla 13: Periodos de vibración para primeros 12 modos en puente sin aislamiento.....	88
Tabla 14: Elementos mecánicos más desfavorables en modelo sin aislamiento.....	90
Tabla 15: Resultados del proceso iterativo para el cálculo de D_y	94
Tabla 16: Resultados del proceso iterativo con dimensiones propuestas del aislador.	99
Tabla 17: Continuación tabla de resultados del proceso iterativo con dimensiones propuestas del aislador.....	99
Tabla 18: Propiedades y datos del aislador diseñado con el espectro de diseño (PRODISIS).....	100
Tabla 19. Propiedades de los aisladores a utilizar en el modelo matemático de análisis.....	102
Tabla 20: Periodos de vibración para los 3 primeros modos en puente con aislamiento.	104
Tabla 21 Elementos mecánicos más desfavorables en modelo sin aislamiento.....	105
Tabla 22 Elementos mecánicos para columna más desfavorables en modelo sin aislamiento	107
Tabla 23 Elementos mecánicos para columna más desfavorables en modelo sin aislamiento	108

RESUMEN

El diseño de estructuras sísmicamente aisladas se ha venido desarrollando desde finales del siglo XX, aportando grandes beneficios al reducir considerablemente el daño potencial que causa un evento sísmico a las estructuras. Sin embargo, la implementación, análisis y diseño de un sistema de aislamiento estructural, es frecuentemente complejo (Naeim et al., 1999). En México, este sistema ha empezado a implementarse en algunas estructuras importantes, dada la alta sismicidad de la zona del Pacífico sur, lo que ha ocasionado daños en edificaciones y vías de comunicación como los puentes carreteros que comunican al pacífico con el centro del país, si alguna estructura vial resulta dañada ante un sismo de alta magnitud, las pérdidas económicas son elevadas y la comunicación se ve entorpecida, es por ello que la implementación de tecnologías como el aislamiento sísmico, pueden contribuir a evitar este tipo de daños colaterales. La escasa implementación de este tipo de tecnologías a los puentes en México se debe a que los métodos de diseño, implican desarrollos complejos o no son aplicables para las condiciones del lugar donde se construyen, por ello la necesidad de establecer procedimientos simplificados que sean una guía de aplicación práctica para el modelamiento y diseño de puentes sísmicamente aislados en las zonas cercanas a los epicentros sísmicos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

México, a lo largo de su historia, ha padecido numerosos eventos sísmicos cuyas consecuencias han sido catastróficas, generando pérdidas económicas y humanas de gran magnitud. Dentro de estas pérdidas y afectaciones que ocasionan, se encuentran los daños a las obras de infraestructura, como los puentes cercanos a los epicentros. El que una vía de comunicación, presente daños o incluso colapso debido a los movimientos telúricos, representa una afectación severa al desarrollo económico y social de la nación. Por lo que en ese sentido se les debe prestar mayor atención en su diseño por sismo con el objeto de que tengan un mejor desempeño estructural.

Los recientes sismos en México, han ocasionado diversos daños en la infraestructura de puentes cercanos a los epicentros, como ocurrió durante los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017, en donde se reportaron colapsos de puentes como los de Asunción Ixtaltepec, ubicado en el estado de Oaxaca y el de la autopista México-Acapulco, tramo Cuernavaca-Chilpancingo (Milenio, 2018).

Ahora bien, desde la segunda mitad del siglo pasado, se han creado diferentes tecnologías para proteger a las estructuras de los daños que ocasionan las fuerzas sísmicas. Una de las más utilizadas es el aislamiento sísmico, que consiste en desacoplar el edificio o estructura de las componentes horizontales del movimiento de la tierra colocando elementos estructurales con baja rigidez horizontal entre la estructura y la cimentación. (Naeim *et al.*, 1999). La regla fundamental de este tipo de sistemas es que la estructura mantenga su funcionalidad después de que se presente un evento sísmico.

En México, el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, Diseño por sismo (CFE, 2015), brinda un panorama general del aislamiento sísmico, al orientar sobre los procedimientos de análisis de estructuras con disipación y aislamiento sísmico.

En este sentido, una de las razones por las que en el país se ve limitado el uso del aislamiento sísmico en las estructuras se atribuye a la complejidad de algunos procedimientos de análisis como es el paso a paso, que requiere de un nivel avanzado de conocimientos técnicos para el modelado de la estructura, además de un tiempo considerable en la interpretación de resultados. Por otro lado, en el país se adolece de un reglamento formal para el diseño y construcción de puentes, por lo que en el caso particular del diseño sísmico con aislamiento se ve la necesidad de adoptar criterios de otros países y complementarlo con las consideraciones del Manual de Obras Civiles (CFE,2015).

Ahora bien, para el diseño sísmico de los puentes se ha optado por la filosofía de diseño basado en fuerzas, aunque en los últimos años se ha vislumbrado la posibilidad de diseñar bajo conceptos basado en desplazamientos, tal como lo establecen Priestley *et al.*, (2007) y Rivera-Vargas (2012), en donde, los diferentes niveles de daño son controlados por las deformaciones de los materiales, los cuales son traducidos en distorsiones o desplazamientos objetivos de la estructura.

Lo ideal sería que, en el país se fomentara el uso del aislamiento sísmico para una mejor protección de los puentes cercanos a las fuentes sísmicas, independientemente de la filosofía de diseño que se adopte. Sin embargo, no se difundido ampliamente el conocimiento sobre este tipo de dispositivos, prueba de ello, es que apenas en el Manual de Obras Civiles (CFE,2015) y en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (NTC-Sismo,2020) se incorporen capítulos relacionados con dispositivos para control de la respuesta sísmicas. Con esto se espera una mayor aplicación de estas tecnologías en las construcciones, en particular en las obras de infraestructura como los puentes.

Sin embargo, se tiene la incertidumbre sobre el uso del aislamiento sísmico en puentes, en parte por la comprensión adecuada de los criterios básicos de su diseño, pese a que existen varios trabajos en la literatura especializada en el tema, tales como: Skinner *et al.*, (1993); Noeim y Kelly (1999); Kelly y Konstantinidis (2011); entre otros. En consecuencia, se requieren de procedimientos de diseño más explícitos que permitan establecer que puentes

son candidatos para incorporares aisladores de base, en función de las propiedades dinámicas del suelo y de la estructura, así como de la cercanía a las fuentes sísmicas; aunado también a la falta de procedimientos de diseño simplificados en donde sean más digeribles tanto la comprensión de la teoría del aislamiento sísmico como la aplicación de los criterios básicos de diseño; además que guíen a la elección adecuada de los tipos de aisladores que se fabrican en el mercado.

1.2 Objetivo y alcance de la investigación

El objetivo de este proyecto de investigación radicó en proponer un procedimiento de diseño sísmico simplificado para puentes con aisladores de base, con el propósito de mejorar su desempeño estructural en zonas cercanas a los epicentros de subducción de las costas del pacífico de la República Mexicana. La investigación se limitó al estudio de puentes estructurados con sistemas de cubierta de concreto presforzado, trabes AASHTO, mientras que la subestructura se caracterizó por disponer de columnas de concreto reforzado que forman marcos en la dirección transversal del puente, así mismo se contempló aisladores a base de neopreno intercalados con placas metálicas y centros de plomo.

1.3 Contenido

El presente trabajo está organizado en seis capítulos cuyos contenidos se describen a continuación.

En el primer capítulo se describen los antecedentes sobre la problemática de los puentes que han sido afectados por los recientes sismos y a necesidad de emplear dispositivos de protección sísmica en los mismo. Así mismo, se presenta el objetivo y alcance de la investigación, además del contenido del trabajo de investigación.

El capítulo dos, se enfoca en comentar los daños observados en puentes por sismos ocurridos en Estados Unidos de América y Japón, así como en la República Mexicana, en los cuales se hace hincapié sobre los principales mecanismos de falla cuando los puentes están cerca de la fuente sísmica.

En el tercer capítulo se abordan algunos conceptos básicos de sismos, así como de las placas tectónicas que predominan en las costas del pacífico del país, poniendo énfasis en los sismos

de subducción que se generan en dicha región. De igual forma, se comentan los sismos históricos que han impactado en México.

El cuarto capítulo se orienta en describir los conceptos básicos del aislamiento sísmico, desde los tipos de aisladores, hasta el comportamiento histerético de los dispositivos. Así mismo se comentan los parámetros de diseño que prevalecen en los aisladores HDRB Y LRB. También se hace mención de los métodos de análisis para el diseño de los aisladores.

En tanto, en el capítulo cinco se presenta la propuesta de procedimiento de diseño sísmico simplificado de puentes con aisladores de base. Se describen cada uno de los pasos de dicho procedimiento; en forma sintética se muestra un diagrama de flujo al respecto. Al final se expone un ejemplo de aplicación.

En el último capítulo se describen las principales conclusiones derivadas de esta investigación, así como las recomendaciones de estudios a futuro.

2. DAÑOS OBSERVADOS EN PUENTES POR SISMO

Durante eventos sísmicos ocurridos en varias partes del mundo, se han reportado pérdidas económicas importantes tras el daño o colapso en obras de infraestructura como los puentes. En ese sentido, a partir del registro de daños es que se toman medidas en los reglamentos de diseño y construcción de puentes como en Estados Unidos de América, tal como ocurrió a partir del sismo de San Francisco en 1971 (Hernández y Campos, 2008).

A continuación, se describirán los principales daños observados durante la ocurrencia de sismos en México y en otros países del mundo, haciendo hincapié en la cercanía a las fuentes sísmicas.

2.1. México

2.1.1. Sismo 19-sep-1985

Este sismo ocurrió en las costas de Michoacán, ha sido uno de los sismos que más han afectado a la sociedad mexicana. Tras el paso de este sismo de magnitud 8.1, los daños mayormente reportados fueron en edificios y a pesar de que los daños en puentes fueron mínimos, uno de importancia considerable, fue en la subestructura del puente de acceso a la isla del Cayacal, cuya distancia al epicentro fue de 85.13 km aproximadamente, en donde se identificó daño en la unión del cabezal, observándose fractura del concreto y pandeo del acero de refuerzo. (Hernández y Campos, 2008)



Figura 2.1 Falla en columna por pandeo del acero de refuerzo y fractura del concreto.

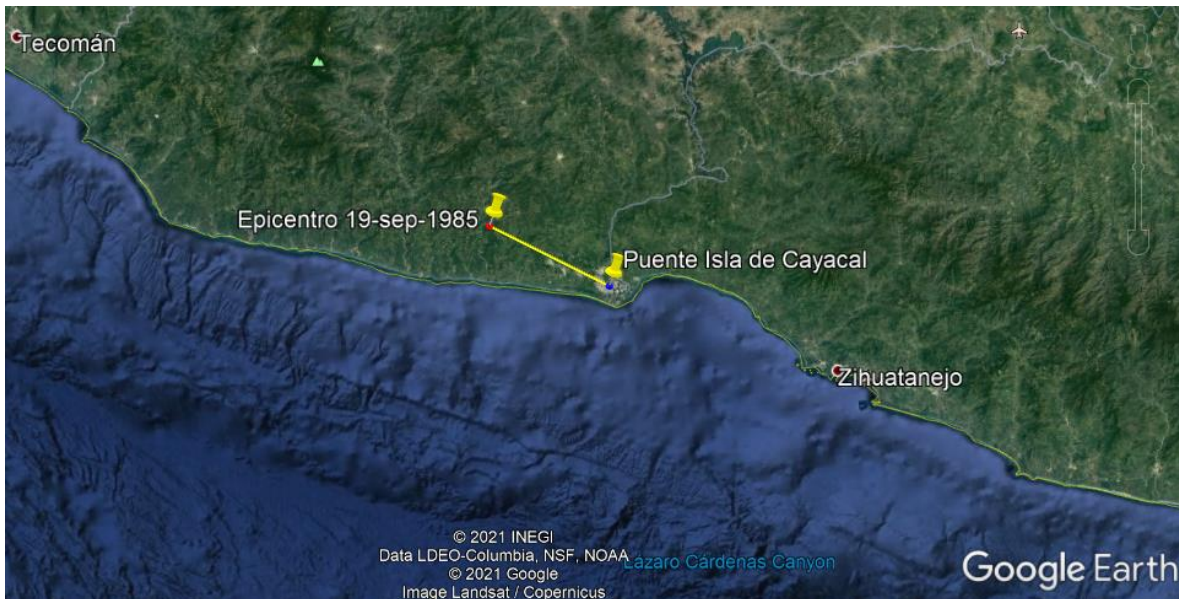


Figura 2.2 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente de la Isla Cayacal.

2.1.2. Sismo 09-oct-1995

Sismo ocurrido en las costas del Estado de Colima, México, con magnitud de 7.5 grados en la escala Richter. La distancia del epicentro a la zona afectada fue de 128.86 km aproximadamente. A consecuencia de este sismo, el Puente Coahuayana de la carretera Playa Azul – Manzanillo, sufrió asentamientos en los accesos, agrietamiento en los cabezales de los estribos, agrietamientos en las pilas y daños severos en los topes sísmico, esto último, debido a la mala distribución e insuficiencia del refuerzo encargado de resistir la fuerza lateral de inercia de la superestructura. (Jara *et al.*, 2006)

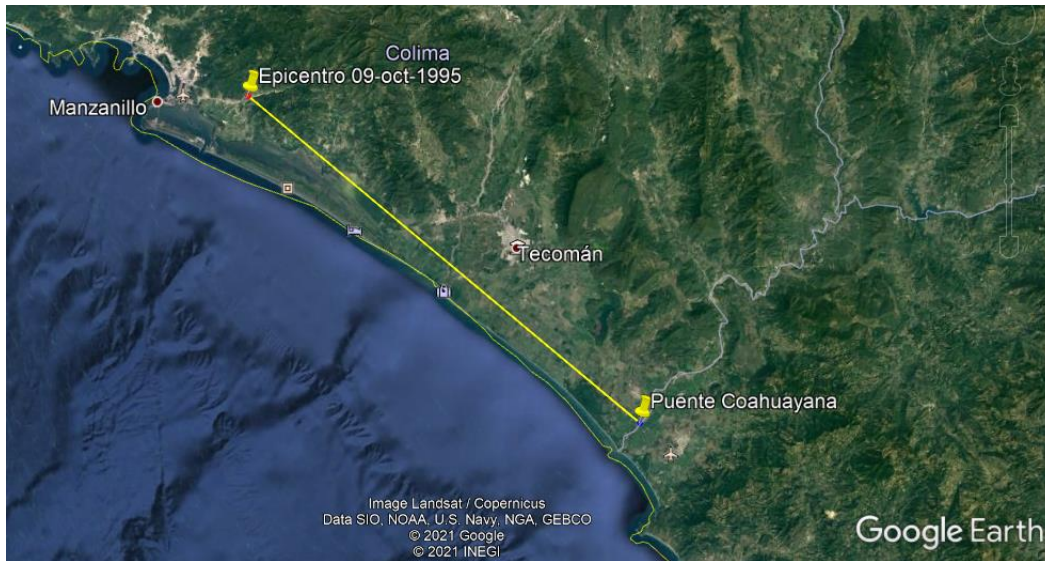


Figura 2.3 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Coahuayana.

2.1.3. Sismo 21-ene-2003

Sismo registrado frente a las costas de Cuyutlán, en el Estado de Colima, con una magnitud de 7.6 en escala de momento. La zona del epicentro a la zona afectada fue de 85.52 km, viéndose afectado el Puente Manzanillo, que registró un desplazamiento lateral de la superestructura, desplazamientos relativos en las pilas y daños en los topes sísmicos, a consecuencia de una deficiencia en el acero de refuerzo del tope.





Figura 2.4 Falla en topes sísmicos y desplazamiento relativos en pilas (Alcocer et al., 2003)

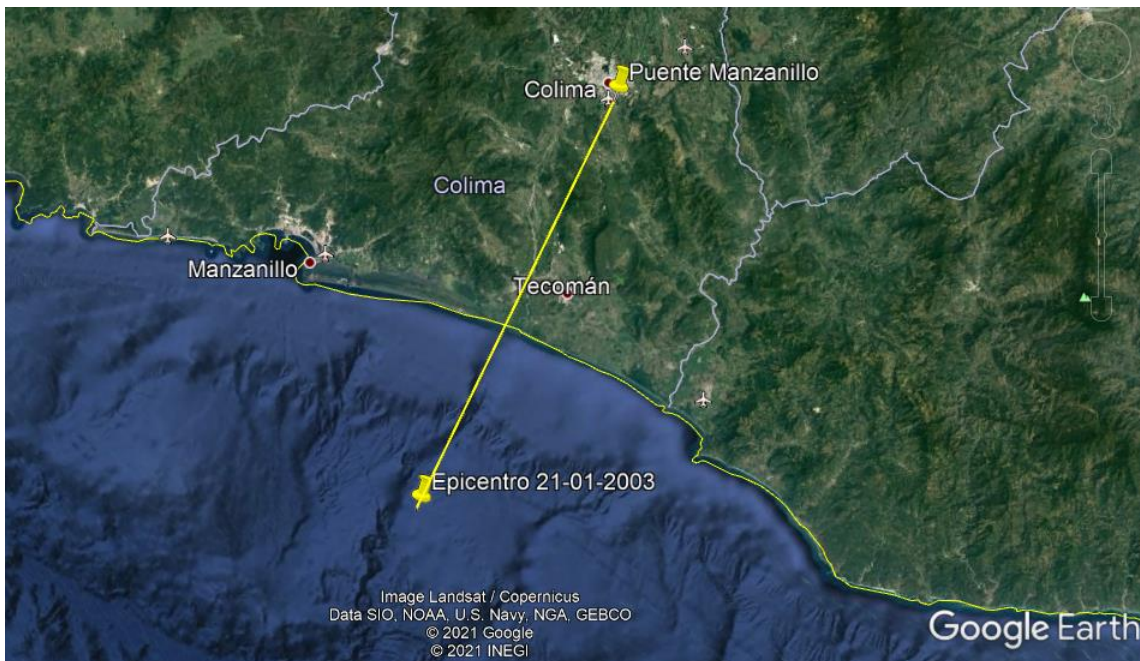


Figura 2.5 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Manzanillo.

2.1.4. Sismo 04-abril-2010

Sismo registrado a 60 Km al sureste de Mexicali, Baja California, con una magnitud de 7.2. La distancia del epicentro a la zona afectada fue de 132.85 km, donde entre los daños estructurales en puentes, se presentó en los topes sísmicos del puente localizado en el tramo carretero Mexicali – Tijuana.



Figura 2.6 Falla en topes sísmicos (Lara, 2013)



Figura 2.7 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Mexicali-Tijuana.

2.1.5. Sismos de septiembre de 2017

Durante septiembre de 2017 en México, se presentaron dos sismos que dejaron a su paso diversos daños en la infraestructura, la economía y la sociedad mexicana. En primer lugar, el sismo del 7 de septiembre, con una magnitud de 8.2, con epicentro a 137 Km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas y doce días después, el 19 de septiembre, un sismo de intraplaca con magnitud de 7.1, se localizó en el límite entre los estados Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos.

Finalmente, el 23 de septiembre, un sismo de magnitud 6.4, con epicentro a 7 km al oeste de Unión Hidalgo, Oaxaca, vuelve a ocasionar un movimiento telúrico.

A raíz de estos sismos, los daños que se observaron en puentes fueron los siguientes:

Puente Ixtaltepec.

El puente resulto con daños tras el sismo del 7 de septiembre, sin embargo, el acontecimiento sísmico presentado 4 días después 23 de septiembre, ocasionó el colapso de la superestructura en uno de los tableros que conforman el puente. La distancia del epicentro del sismo con fecha del 7 de septiembre al puente de Ixtaltepec es fue de 208.89 km, mientras que del sismo con fecha del 23 de septiembre fue de 28.17 km, aproximadamente.



Figura 2.8 Colapso de superestructura (Twitter @PoliciaFedMx)



Figura 2.9 Distancia de los epicentros a zona de afectación del puente Ixtaltepec.

Puente La Ventosa

Debidos a estos mismos sismos, las 5 vigas metálicas tendieron a girar en conjunto sobre un punto de apoyo localizado en uno de sus estribos, provocando deslizamiento, provocando la falla de los topes sísmicos y que las vigas quedaran fuera de los apoyos. La distancia del epicentro del sismo con fecha del 7 de septiembre al puente La Ventosa es fue de 211.20 km, mientras que del sismo con fecha del 23 de septiembre fue de 16.65 km, aproximadamente.



Figura 2.10 Distancia de los epicentros a zona de afectación del puente La Ventosa.

Puente Ing. Ricardo Bahena Brito

Debido al sismo del 19 de septiembre de 2017, se registró el colapso total del puente. La distancia desde el epicentro del sismo, hasta el puente afectado fue de 90.30 km aproximadamente.



Figura 2.11 Colapso total de puente

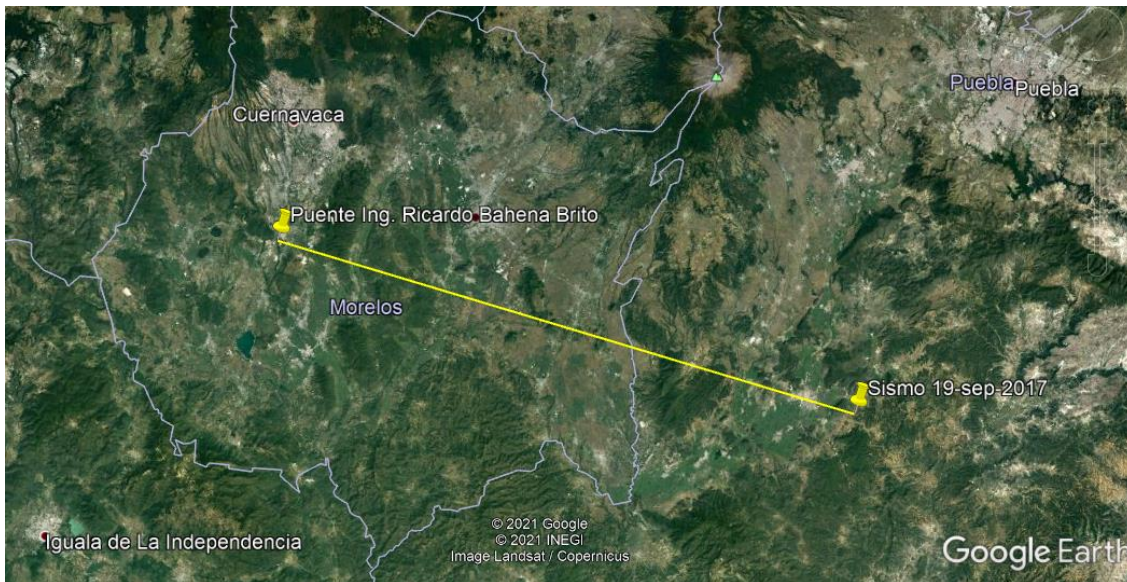


Figura 2.12 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Ing, Ricardo Bahena Brito.

2.1.6. Tabla resumen “Daños por sismos en México”

A continuación, se presenta una tabla comparativa con el fin de resumir las distancias epicentrales de cada sismo a los diferentes puentes afectados:

Fecha	Ubicación del epicentro	Puente afectado	Distancia epicentral aproximada (km)
19 – septiembre – 1985	Costas de Michoacán	Cayacal	85.13
09 – octubre – 1995	Costas de Colima	Coahuayana	128.86
21 – enero – 2003	Costas de Cuyutlán	Manzanillo	85.52

04 – abril – 2010	Sureste de Mexicali	Carretera Mexicali - Tijuana	132.85
07 – septiembre – 2017	Suroeste de Pijijiapan	Ixtaltepec	208.89
		La Ventosa	211.20
19 – septiembre – 2017	Límites de Puebla y Morelos	Ing. Ricardo Bahena Brito	90.30
23 – septiembre – 2017	Oeste de Unión Hidalgo	Ixtaltepec	28.17
		La Ventosa	16.65

Tabla 1: Daños por sismos de fuente cercana en puentes.

2.2. Otras partes del mundo

2.2.1. Loma Prieta, 17-oct-1989

Este sismo ocurrió en la falla de San Andrés, al sur de la Bahía de San Francisco, con una magnitud de 7.1 en escala Richter y aceleración máxima de 6.5 cm/s^2 , la distancia del epicentro a la zona afectada fue de 95.00 km aproximadamente. Los daños observados fueron la pérdida de apoyo de la calzada en el puente San Francisco-Oakland, (Hernández, 2005). La falla se presentó en los tableros superior e inferior de un claro simplemente apoyado de 15 metros que contactaba dos tramos del puente, además de fallas en los pernos de conexión, desplazamiento en una pila y pérdida de longitud de asiento en las vigas. (Jara *et al.*, 2006)



Figura 2.13 Falla en tableros superior e inferior del puente de la Bahía Oakland- San Francisco, Sismo de Loma Prieta, 1989 (Nakata, *et al.*, 1999)

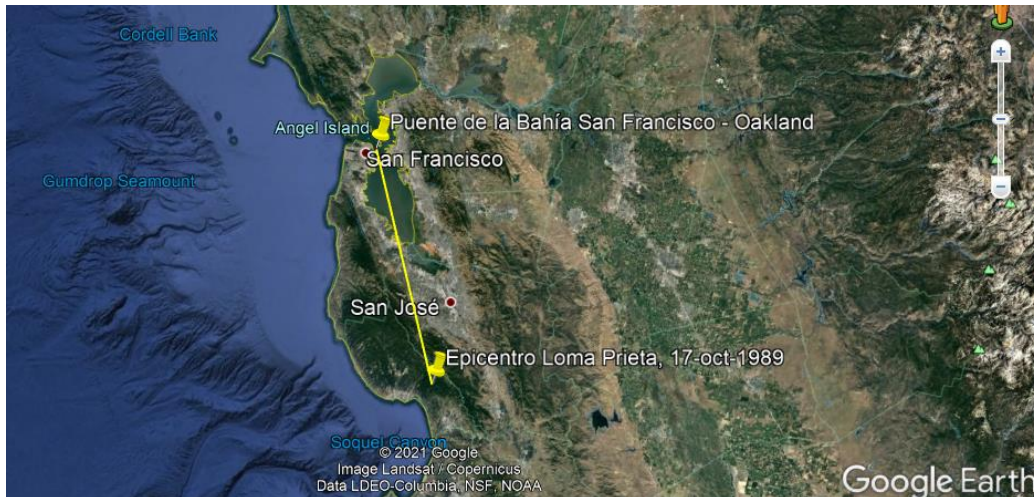


Figura 2.14 Distancia del epicentro a zona de afectación del Puente de la Bahía San Francisco – Oakland.

2.2.2. Northridge, 17-ene-1994

Sismo ocurrido en el área norte del Valle de San Fernando, en la ciudad de Los Ángeles, con una magnitud de 6.7 en la escala Richter, la distancia del epicentro a la zona afectada fue de 364 km y dicho sismo, tuvo una profundidad de 18.3 km. De los daños más severos en puentes, fueron para el distribuidor Gavin Canyon, que es un puente esviado formado por tres estructuras de 5 tramos, esta soportada por columnas, crujías y estribos. Compuesta por una trabe cajón central de concreto presforzado y complementado con traveses de concreto reforzado (Hernández, 2008). Los daños en este puente fueron la pérdida de los apoyos en las juntas de expansión, movimientos de traslación y rotación de los estribos diafragmas y grietas menores en las bases de las columnas.



Figura 2.15 Falla por pérdida de apoyos y movimiento de traslación y rotación de estribos y diafragmas.

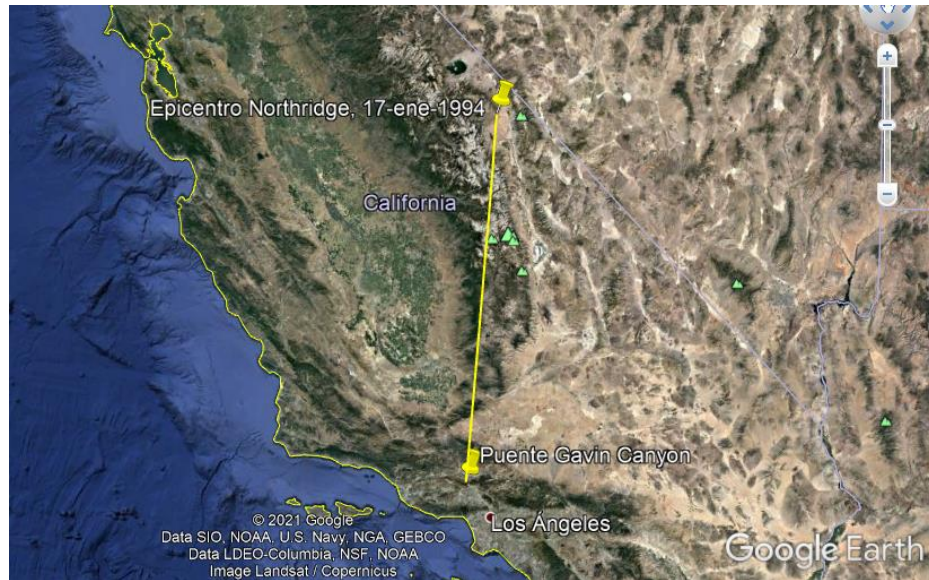


Figura 2.16 Distancia del epicentro a zona de afectación del Puente Gavin Canyon.

2.2.3. Kobe, 19-ene-1995

Sismo presentado cerca del puerto de Kobe, en Japón, con una intensidad de 6.8 en escala Richter y un rango de magnitud mayor al del sismo de Northridge. Uno de los múltiples daños presentados a raíz de este sismo fue en el Viaducto Fukae, donde se presentaron fallas por cortante a aproximadamente dos tercios de la columna, debido a la insuficiencia de los estribos. La distancia epicentral de dicho sismo al puente dañado fue de aproximadamente 182.28 km y la profundidad de 16 km.



Figura 2.17 Falla por cortante en columnas.

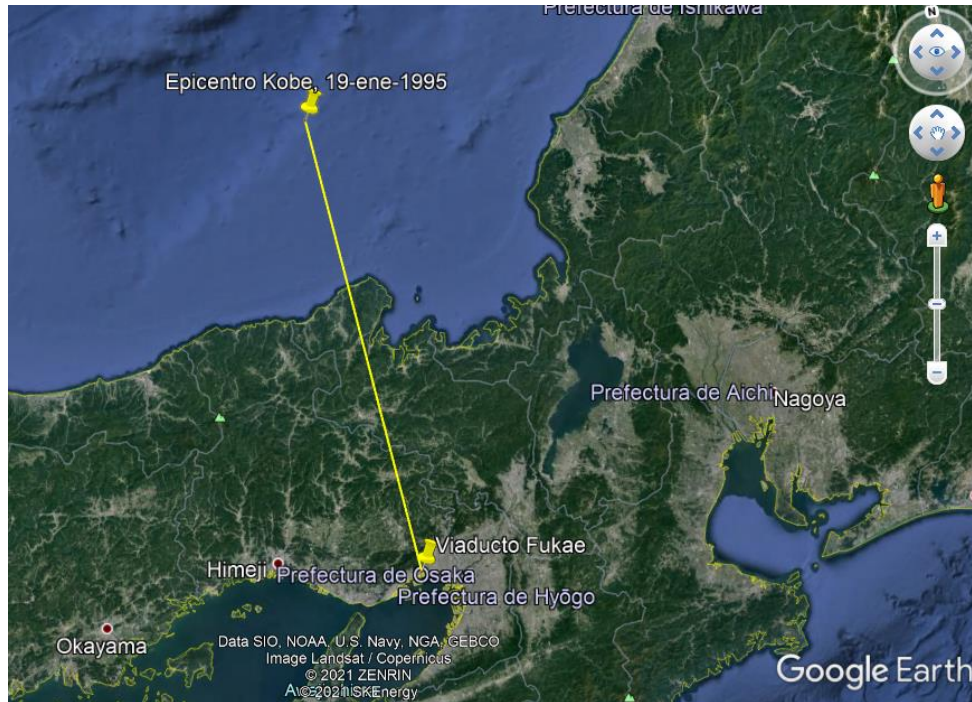


Figura 2.18 Distancia del epicentro a zona de afectación del Viaducto Fukae.

2.2.4. Wenchuan, 12-may-2008

Sismo ocurrido en el condado de Wenchuan, a 90 km al noreste de Chengdu, China; con una magnitud de 8.0. Uno de los múltiples daños registrados debido a este sismo fue el del puente Baihwa, cuya distancia de la zona de ubicación al epicentro fue de 10.81 km aproximadamente. Este puente de claro continuo de concreto reforzado, sostenido por columnas gemelas con viga de techo sobre junta de dilatación y columnas gemelas sin viga de techo para el resto de los soportes, sufrió un colapso total debido a efectos de acoplamiento de flexión y torsión (Lin *et al.*, 2010).





Figura 2.19 Colapso del puente Baihwa (Lin *et al.*, 2010).



Figura 2.20 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Baihwa.

2.2.4. Chile, 27-feb-2010

El sismo de Chile de 2010 con una magnitud de 8.8 tuvo lugar frente a la costa de la Región de Ñuble, al noroeste de Concepción y al suroeste de Cauquenes. Uno de los múltiples daños a la infraestructura, se presentó en un tramo de puente vehicular de la autopista Vespucio Norte, a la altura del paso Miraflores, donde se registró el colapso de la superestructura. La distancia del epicentro a dicho puente es de aproximadamente 752.50 km; la profundidad de este fue de 30.1 km.



Figura 2.21 Colapso del puente Autopista Vespucio Norte.



Figura 2.22 Distancia del epicentro a zona de afectación del puente Autopista Vespucio Norte.

3. CARACTERÍSTICAS SISMOLÓGICAS DE LA COSTA DEL PACÍFICO MEXICANO

En México existe una alta sismicidad que se debe a la interacción de las diversas placas tectónicas, así como también de fallas locales en diversas regiones del territorio mexicano, de tal forma que la actividad sísmica da lugar a una liberación del 3% de la energía del mundo (Domínguez, 2013).

De esta manera, el país suele ser afectado por sismos de subducción, falla normal e intraplaca, cada uno con diferentes características de movimiento, tal como se comenta en el trabajo de Jaimes (2002).

Sin embargo, para los fines de esta investigación son de interés los sismos de subducción que se presentan en la zona del Pacífico, que han dejado diversas afectaciones en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco. Es por esta razón que se le ha dado mayor importancia al estudio de la sismicidad del país y su efecto en los puentes.

3.1. Sismos históricos de subducción

La actividad sísmica de México ha sido monitoreada y estudiada desde principios del siglo XX. La red sismológica mexicana fue inaugurada en 1910, desde entonces, se ha mantenido el registro continuo de sismos a lo largo y ancho del país. A pesar de esto, diferentes sismos fueron registrados en diferentes documentos históricos a lo largo de la historia. En el trabajo de Zúñiga *et al.* (1997), presenta un registro de sismos históricos que fueron interpretados de acuerdo a los daños reportados y también, de los que fueron reportados durante el periodo experimental. A continuación, se presenta un resumen de los sismos de subducción de mayor intensidad registrados en las costas del Pacífico desde 1697 y hasta 2018.

En la tabla 2, se presentan los sismos históricos de subducción interpretados por Zúñiga *et al.* (1997), mientras que en la tabla 3 se muestran los sismos reportados a partir del periodo de la instrumentación.

Tabla 2: Sismos históricos de subducción interpretados sismológicamente por Zúñiga *et al.* (1997)

Fecha	Epicentro	Magnitud interpretada	Descripción
07/febrero/1697	Costas de Guerrero	7.5	Terremoto de subducción cerca de Acapulco, Gro. Causó daño a lo largo de la costa, pero no así en la Ciudad de México.
01/septiembre/1754	Costas de Guerrero	7.8	La información macro sísmica claramente sugiere un evento del tipo de subducción cercano a Acapulco, Gro. Hay evidencia de un tsunami local.
21/abril/1776	Acapulco, Guerrero	7.7	Daños reportados en la ciudad de México y en Acapulco, Gro.
31/mayo/1818	Jalisco - Colima	8.2	Evento de subducción en la costa de Jalisco y Colima. El daño a lo largo de la costa y en la ciudad de México sugiere que la magnitud sería cuando menos equivalente a la del evento de Jalisco de 1932
04/mayo/1820	Costa de Guerrero	7.8	Evento de subducción en la costa de Guerrero
07/abril/1845	Costa de Guerrero	8.3	Uno de los sismos mayormente sentidos en la ciudad de México en el siglo XIX. No hay suficiente información a lo largo de la zona macro sísmica para definir la localización epicentral y área de ruptura. La gran extensión de la zona de daño reportada sugiere un evento de gran magnitud. Ocasionó graves daños a las construcciones de la ciudad de México. 19/junio/1858
19/junio/1858	Región central de Michoacán	7.5	Fuertes daños tierra adentro en la parte central de Michoacán sugieren que no se trata de un tipo costero de cabalgadura en la zona de subducción. Fue sentido en la extensa región particularmente

			indujo graves daños en la ciudad de México. El patrón de los daños es similar al evento del 15 de enero de 1931 lo que indica que se trata de un evento tensional en el interior de la placa de Cocos subducida.
11/febrero/1875	Jalisco	7.1	Macro sismo en la parte occidental del Cinturón Volcánico Mexicano. Uno de los eventos someros más grandes en esta región

Tabla 3: Sismos de subducción en el periodo instrumental (Zuñiga *et al*, 1997) (Servicio Sismológico Nacional)

Fecha	Epicentro	Magnitud
14/abril/1907	Guerrero, cerca de Acapulco	7.9
30/julio/1909	Costa Grande, Guerrero	7.5
07/junio/1911	Costas de Michoacán	7.8
03/junio/1932	Costas de Jalisco	8.2
15/abril/1941	Costas de Colima	7.9
28/julio/1957	Cerca de Acapulco	7.7
19/septiembre/1985	Costas de Michoacán	8.1
21/septiembre/1985	Guerrero, cerca de Zihuatanejo	7.6
30/abril/1986	Costas de Michoacán	7
14/septiembre/1995	Ometepec, Guerrero	7.3
09/octubre/1995	Cotas de Colima	8
25/febrero/1996	Costas de Oaxaca	7.1
30/septiembre/1999	60 kilómetros al noroeste de Puerto Angel	7.4
09/agosto/2000	Costa de Guerrero y Michoacán	7
21/enero/2003	Costa de Colima, 60 kilómetros al sureste de Manzanillo	7.6
20/marzo/2012	29 kilómetros al sur de Ometepec, Guerrero	7.5
18/abril/2014	40 Kilómetros al sur de Petatlán, Guerrero	7.2
07/julio/2014	47 kilómetros al suroeste de Tapachula, Chiapas	7.1
07/septiembre/2017	133 kilómetros al suroeste de Pijijiapan, Chiapas	8.2
16/febrero/2018	11 kilómetros al sur de Pinotepa Nacional, Oaxaca	7.2

3.2 Conceptos básicos de sismología

Se le conoce como sismo, al movimiento que se presentan en la superficie de la tierra, y estos son comúnmente causados por la liberación de energía que libera el movimiento de las

grandes placas tectónicas que conforman la superficie de la tierra. Sin embargo, también pueden presentarse sismos debidos la caída de cavernas subterráneas, la actividad volcánica, etc (Sánchez, 2015). La energía que se libera tras el movimiento, suele propagarse a través de la roca en forma de ondas, generando vibraciones y son estas las que ocasionan efectos adversos en la infraestructura del hombre (Ángeles, 2016).

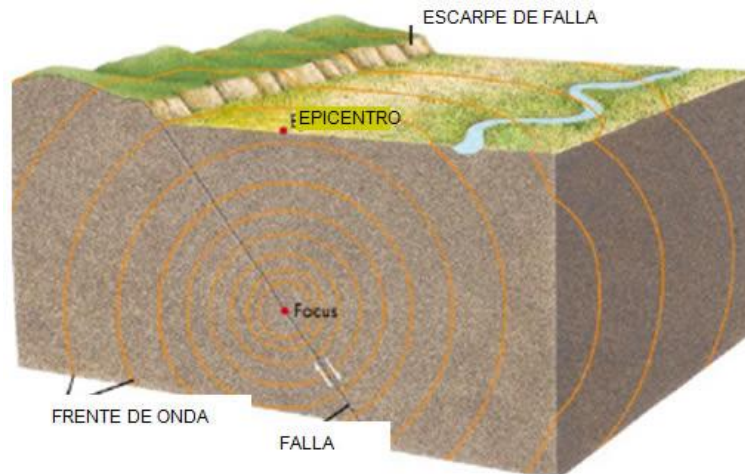


Figura 3.1. Propagación de ondas sísmicas. Fuente: SGM

De acuerdo con la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (CENAPRED, 2014), se definen los siguientes conceptos:

Sismología

Se le llama sismología a la parte de la geología que se encarga del estudio de los terremotos; fuentes sísmicas, propagación de ondas a través de la tierra, excitación del terreno en superficie y a profundidad, etc.

Foco

Se le denomina foco al punto de origen del sismo, en el interior de la tierra, este es el lugar donde se origina la ruptura que se extiende para la formación del plano de falla. También es llamado centro, hipofoco o hipocentro.

Epicentro

El epicentro o también llamado epifoco es la proyección vertical del foco que puede ser ubicado en la superficie de la tierra.

3.2.1. Escalas de intensidad y magnitud

La magnitud de un sismo, es el valor que mide la cantidad de energía que se libera debido al evento sísmico. Al ser un valor cuantitativo, se utilizan los registros de sismógrafos para poder obtener un valor. Existen distintas escalas de magnitud, de entre las más comunes se encuentran:

Magnitud local

Término de medición usado por primera vez en 1935 por el Sismólogo del California Technological Institute, Charles Richter y fue desarrollada para sismos locales en el sureste de California. A esta escala de magnitud se le conoce como “escala de magnitud Richter”.

Magnitud de momento

Esta escala es común para determinar la magnitud de sismos fuertes, debido a que se considera el tamaño completo del evento. Para esto, el momento sísmico puede ser calculado por medio del desplazamiento de la falla como se muestra en la siguiente ecuación:

$$M_0 = \mu A_f D \quad (3.1)$$

donde:

M_0 es el momento sísmico en N-m

μ es el módulo de cortante del material a lo largo del plano en N/m²

A_f es el área del plano de falla donde se presenta el desplazamiento en m²

D es el desplazamiento promedio del segmento de falla de ruptura en m.

Hanks y Kanamori (1979) desarrollaron la escala de magnitud de momento, la cual es calculada con la siguiente expresión:

$$M_w = -6.0 + 0.67 \log M_0 \quad (3.2)$$

donde:

M_0 es el momento sísmico en N-m

M_w es la magnitud de momento sísmico

La intensidad sísmica en comparación de la magnitud es un grado que se asigna de manera subjetiva en función de los daños causados a las construcciones, suelo natural y demás efectos que pueden causar dichos eventos.

La escala más utilizada para determinar la intensidad sísmica es la de Mercalli modificada, que se basa en las observaciones de daños a las estructuras y la presencia de efectos secundarios, como licuación, deslizamientos en el terreno y colapso, además de que considera la percepción humana del evento (Sánchez, 2015).

Escala de intensidad de Mercalli Modificada Abreviada (CENAPED, 2014)	
I	No sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido solo por pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos suspendidos suelen oscilar delicadamente.
III	Sentido muy claramente en interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, pero mucha gente no lo reconoce como terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos, Por la noche algunos despiertan. Platos, ventanas y puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos planos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asuntan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente; considerable en edificios corrientes sólidos con colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de chimeneas, rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Conductores de automóviles entorpecidos.

IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la vertical; grande en edificios solidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunos edificios bien contruidos en madera, destruidos; la mayoría de las estructuras de ladrillo, destruidas junto con los cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales y de nivel, deformadas. Objetos lanzados al aire.

3.2 Sismicidad en México

La corteza terrestre, está conformada por diversas placas de diferentes dimensiones que se mueven entre si y varían en cuestiones de grosor de acuerdo con su composición, a cada una de estas placas, se les denomina placas tectónicas y estas a su vez, conforman la litosfera terrestre. El movimiento de dichas placas se debe a las diferentes corrientes del material que subyace a la litosfera. Las velocidades y direcciones con las que placas pueden desplazarse, pueden ser diferentes, dando lugar a interacciones entre ellas y como consecuencia la aparición de montañas, volcanes, sismos y fallas geológicas (Sánchez, 2015)

El territorio mexicano, se encuentra dividido en 5 placas tectónicas: Pacífico, Norteamérica, Caribe, Rivera y Cocos (Figura 3.2). Las dos últimas son las que históricamente han generado mayor número de movimientos telúricos. Por otro lado, las placas del Pacífico y Norteamérica se mueven en direcciones diferentes, las cuales también han ocasionado una gran actividad sísmica en la zona noroeste al existir separación entre ellas.

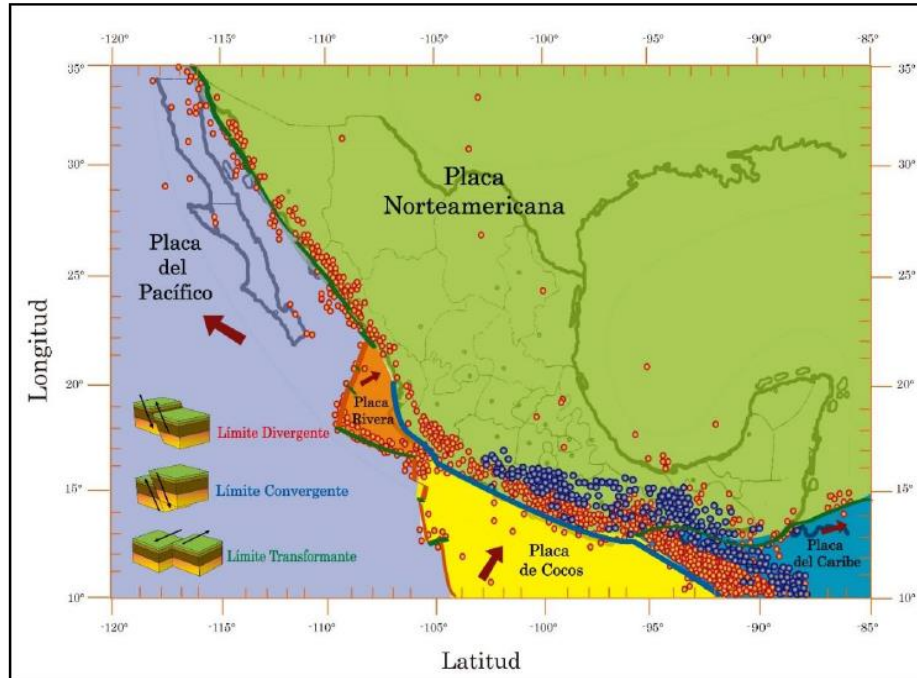


Figura 3.2. Principales placas tectónicas y su tipo de límite, que afectan la República Mexicana. Sismos de profundidad intermedia (azul) y someros (anaranjado). (Sánchez, 2015)

Los sismos en México suelen generarse principalmente por cuatro tipos de fuentes sísmicas, según Rosenblueth (1987):

1. Sismos locales, originados dentro o cerca de la cuenca
2. Sismos de intraplaca, que son los que se originan en el resto de la placa de Norteamérica y que, suelen ser ocasionados por fallas geológicas
3. Sismos de profundidad intermedia de falla normal, causados por el rompimiento de la placa de cocos ya subducida
4. Sismos de Subducción

Para fines de este trabajo de investigación, se comentará con mayor detalle los sismos de subducción.

3.3 Sismos de Subducción

La zona costera del Pacífico mexicano, es donde se originan los sismos de subducción, esto debido a que la mayor parte del territorio, se encuentra sobre la Placa Norteamericana y esta,

tiende a desplazarse hacia el oeste, mientras que la placa continua, llamada Placa de Cocos, se desplaza hacia el noreste

El fenómeno de subducción se origina cuando dos placas que se desplazan en direcciones opuestas chocan y se presenta el hundimiento de una, debajo de la otra, provocando sismos de gran magnitud. (Figura 3.3)

Los sismos de subducción poseen mecanismos del tipo de falla inversa, dado que se libera energía acumulada entre las zonas e interacción de las placas tectónicas a lo largo de los límites convergentes de las mismas (Jaimes, 2002).



Figura 3.3: Zona de subducción. Fuente: Servicio Geológico Mexicano

Como se mencionó anteriormente, las placas Rivera y la de Cocos se encuentran en subducción con la placa de Norteamérica, siendo propensa a grandes movimientos telúricos. La zona de subducción que generan estas placas, abarca gran parte de la costa del pacífico mexicano y tiene periodos de recurrencia de 30 a 40 años para sismos de magnitud 7 o mayor. La longitud de la ruptura de los sismos de subducción que han ocurrido durante este siglo en México, varía entre 50 y 200 km de largo. Estos sismos son sismos someros y se concentran entre los 5 y 35 km de profundidad (Kostoglovov y Pacheco, 1999).

Brechas sísmicas

Se le conoce como brecha sísmica a la zona donde convergen dos placas tectónicas y que a pesar de ser una sísmicamente activa, no ha presentado actividad en un tiempo considerable. En México, existen dos brechas sísmicas, una frente a las costas de Michoacán y otra frente a las costas del estado de Guerrero.

Brecha de Guerrero

La costa de Guerrero está definida por una brecha sísmica en donde no se ha presentado ningún sismo de grandes magnitudes en los últimos años (Figura 3.4). Con el transcurso de los años en una región donde no ha ocurrido un sismo, existe una mayor probabilidad de que se presente uno. Esta brecha, abarca una extensión de 230 km desde Acapulco hasta Papanaoa y está localizada en la zona de subducción que forman la placa de Cocos y la placa de Norteamérica.

En la brecha de Guerrero, entre 1899 y 1911, ocurrieron 4 sismos de magnitudes entre 7.5 y 7.8. Los últimos eventos registrados en esta brecha, con epicentro en la costa de Guerrero se muestran en la tabla:

Fecha	Mw
07/abril/1845	8.0
24/enero/1899	7.7
14/abril/1907	7.9 – 8.2
26/marzo/1908	7.6
30/julio/1909	7.5
16/diciembre/1911	7.6

Tabla 4: Últimos eventos registrados en la brecha de Guerrero.

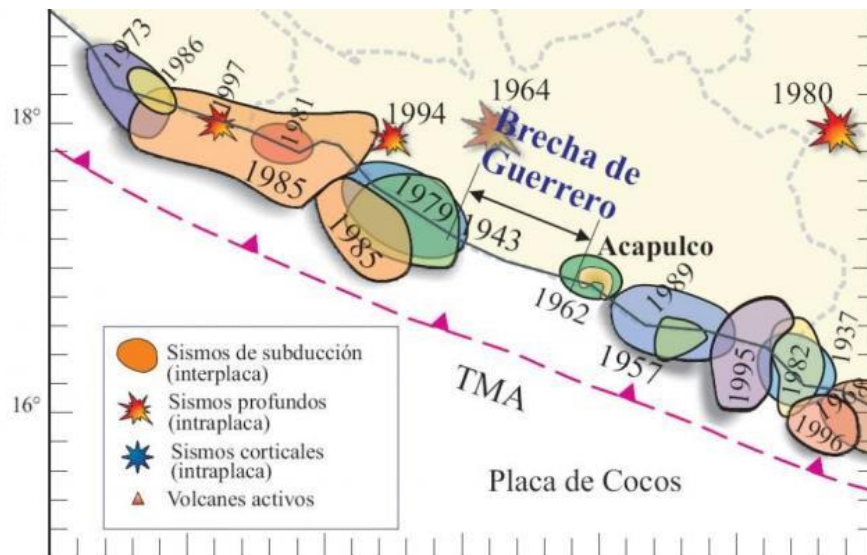


Figura 3.4: Brecha de Guerrero y sismos históricos cercanos. Fuente: SSN, UNAM

Brecha de Michoacán

La brecha de Michoacán posee una extensión de aproximadamente 200 km y se extiende desde las costas de los estados de Guerrero, Michoacán y el sur de las costas de Colima (Figura 3.5). Al igual que la brecha de Guerrero, la brecha de Michoacán se encuentra dentro de la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica.

De acuerdo con registros históricos de esta región, el 7 de junio de 1911 fue cuando se produjo un sismo de magnitud 7.7 con epicentro en las costas de Michoacán y no fue sino hasta 1973 durante el sismo de Colima, que se registró otro con una magnitud semejante de 7.6 y de esta manera se pudo delimitar con seguridad la longitud de la brecha.

El 19 de septiembre de 1985 ocurrió un terremoto con magnitud de 8,1 que liberó gran parte de la energía acumulada en la zona. Con la réplica de este sismo el día 20 de septiembre del mismo año y con magnitud de 7.6, se terminó de liberar la energía de la brecha. Otra replica se presentó el 30 de abril de 1986 con una magnitud de 7.0. Desde entonces y en los últimos años, solo se ha vuelto a registrar otro acontecimiento sísmico de magnitud considerable el 21 de abril del 2013 con una magnitud de 5.8 (Avellaneda, 2018).



Figura 3.5: Ubicación de las brechas de Guerrero y Michoacán.
Fuente: SSN, UNAM, 1982.

4. DISEÑO DE PUENTES SÍSMICAMENTE AISLADOS

En el diseño sísmico de puentes se pretende la disipación de energía, que el sismo les introduce, se capitalice por medio de los mecanismos de deformación inelástica bajo un daño controlado. Sin embargo, esta situación puede ser perjudicial en la mayoría de los puentes carreteros en donde el daño debe ser ligero o nulo para que puedan seguir brindando servicio después de la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad. En este sentido el aislamiento sísmico resulta una buena alternativa para mantener intacta la integridad de los puentes, sobre todo aquellos que están cercanos a la fuente sísmica.

4.1. Conceptos básicos de aislamiento sísmico

El concepto básico del aislamiento sísmico se refiere al desacoplamiento de la estructura de las componentes horizontales que se generan con el movimiento del suelo (fuerzas sísmicas), apoyándola sobre una base flexible horizontalmente y con una rigidez vertical capaz de soportar las cargas propias de la estructura.

Para comprender la respuesta dinámica, se revisarán brevemente las ecuaciones básicas de dinámica estructural sobre la teoría lineal del aislamiento sísmico, conforme al trabajo de Naeim y Kelly (1999).

Considérese un sistema de dos grados de libertad, tal como se muestra en la figura 4.1. La masa m representa la superestructura del puente y m_b es la masa de la base que está apoyada sobre el sistema de aislamiento. La rigidez y amortiguamiento de la estructura están representados por k_s y c_s , respectivamente, mientras que la rigidez y el amortiguamiento del aislamiento sísmico están dados por k_b y c_b , respectivamente.

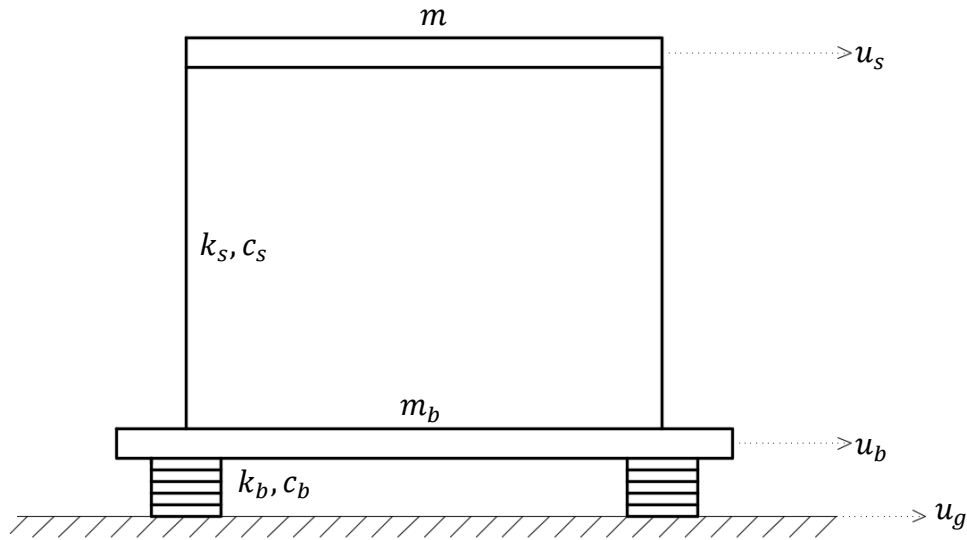


Figura 4.1: Parámetros del sistema aislado de dos grados de libertad.

Los desplazamientos absolutos de las dos masas están denotados por u_s y u_b , mientras que sus respectivos desplazamientos están dados por:

$$v_b = u_b - u_g \quad (4.1)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (4.2)$$

donde, u_g es el desplazamiento del terreno.

El incorporar los desplazamientos relativos es conveniente para este tipo de análisis, debido a que los dos resultados más importantes serán el desplazamiento del sistema aislado, representado por v_b , y la distorsión de entrepiso, dado por u_s .

Aplicando la suma de fuerzas horizontales al primer grado de libertad, se obtiene:

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_s \quad (4.3)$$

De igual forma, aplicando la suma de fuerzas horizontales al segundo grado de libertad, se tiene:

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_b = -m\ddot{u}_g \quad (4.4)$$

Para mayor información sobre el desarrollo de las ecuaciones diferenciales 4.3 y 4.4, se puede consultar el trabajo de Naeim y Kelly (1999).

Escribiendo las ecuaciones anteriores en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (4.5)$$

donde, $M = m + m_b$

$$M\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -M_r\ddot{u}_g \quad (4.6)$$

Con base en la ecuación 4.6 se puede realizar el análisis de la respuesta dinámica del puente con el sistema de aislamiento sísmico, en donde, varios programas de análisis estructural como el SAP2000 poseen algoritmos numéricos para su solución.

En la tabla 5, se comparan algunos parámetros básicos asociados a su forma modal de vibración fundamental entre estructuras con base fija y con aisladores de base. En dicha tabla se puede apreciar que la masa (m, m_b) y la rigidez lateral (k_s, k_b) contribuyen a que el periodo fundamental sea distinto entre un sistema de apoyo u otro, siendo mayor para el caso de la estructura con aisladores de base, situación similar ocurre con el amortiguamiento del sistema, el cual es mayor para el sistema con aislamiento sísmico.

Tabla 5. Comparación de parámetros entre estructuras con base fija y con aisladores de base (Gomez, 2007).

Sistema con apoyo fijo	Sistema con aislamiento de base
$w_f = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$	$w_b = \sqrt{\frac{k_b}{m + m_b}}$
$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_s}}$	$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_b}{k_b}}$
$\beta_f = \frac{c}{2m w_f}$	$\beta_b = \frac{cb}{2(m + m_b) w_b}$

w = frecuencia circular

T = periodo fundamental de vibración

β = porcentaje de amortiguamiento crítico

El propósito fundamental del aislamiento sísmico es reducir las demandas sísmicas, aumentando el periodo de vibración natural de la estructura, alejándola así, de la zona de mayor concentración de energía (Skinner *et al*, 1993). Cuando el componente aislador posee algún tipo de disipador de energía como es el núcleo de plomo en el centro, la energía es liberada a través de éste y no a través de un daño estructural en alguno de los elementos de la estructura, incrementando de esta manera la eficiencia de todo el sistema (Wagner, 2017). Como consecuencia del aumento del periodo de vibración, se presenta un incremento también, de los desplazamientos de la estructura (figura 4.2) sin embargo y en la mayoría de los casos, estos no representan inconvenientes, debido a que estos desplazamientos son a causa de la flexibilidad horizontal de los aisladores y no de los elementos de la estructura. Por otro lado, debe tomarse en cuenta que el aumento del periodo fundamental de la estructura, puede ser un inconveniente cuando la ubicación de desplante conlleva a periodos largos del terreno, dicha situación, suele ser común en depósitos arcillosos con alto contenido de agua, tal y como ocurre con la Ciudad de México. Por lo tanto se tiene el inconveniente de uso en suelos arcillosos o blandos.

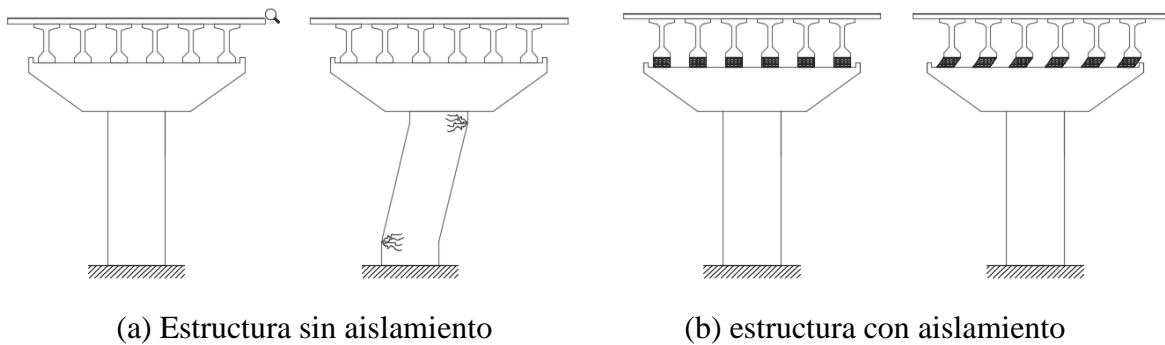


Figura 4.2: Desplazamientos en estructura con y sin aislamiento sísmico.

Como se observa en la figura 4.2(a), la estructura sin aislamiento presenta importantes deformaciones, debidas a las fuerzas sísmicas que se aplican sobre a la estructura, por el contrario, cuando se presentan las mismas fuerzas aplicadas en una estructura con aislamiento de base, se reducen considerablemente las deformaciones en los elementos base.

De acuerdo con el Manual de Obras Civiles (CFE, 2015), los sistemas de aislamientos sísmico pueden proporcionar dos niveles de protección sísmica, un aislamiento total y un aislamiento parcial. El primero, tiene como propósito que la estructura permanezca dentro

del intervalo elástico con excepción del sistema de aislamiento, evitando así, el daño en los elementos de la estructura, dado que se evitará que la estructura sea la encargada de disipar la energía proporcionada por el sismo. En el segundo, se permite que los elementos de la estructura excedan los límites de fluencia, con valores de ductilidad limitada, permitiendo la ocurrencia de daños durante el sismo de diseño, limitados a niveles mayores que los de un diseño convencional.

Es importante señalar que el aislamiento sísmico es recomendable en estructuras rígidas y que no tengan una elevada relación altura/ancho, dado que pueden presentar grandes momentos de volteo y promover una pérdida de equilibrio. Por otro lado, al incrementar la altura, las ventajas obtenidas a partir del aumento del periodo de vibración de la estructura disminuyen (Bonilla, Lily, 2012).

4.2 Tipos de aisladores sísmicos

Como se ha comentado, el aislador sísmico es un elemento flexible que se coloca entre la estructura y la cimentación, con el fin de transmitir la menor cantidad de movimiento en la estructura, al momento de ocurrencia de un movimiento sísmico (Genatios y Lafuente, 2016). Cabe mencionar, que los aisladores sísmicos no están diseñados para asimilar movimientos verticales, sin embargo, deben resistir las cargas gravitacionales, por lo que poseen una gran rigidez vertical.

Existen diferentes tipos de sistemas de aislamiento sísmico, los cuales pueden clasificarse en dos grandes grupos: elastoméricos (con o sin núcleo de plomo) y aisladores de deslizamiento o friccionantes. A continuación, se describen cada uno de ellos.

Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos, constan de diferentes capas de algún material flexible, como puede ser neopreno, o algún hule natural, intercaladas con láminas de acero, que les proporciona una mayor resistencia a las cargas verticales que transmite la estructura, además, restringe las deformaciones verticales excesivas en las capas de material flexible sin afectar los desplazamientos laterales del dispositivo. Dentro de este tipo de aisladores, se encuentra

el apoyo laminado o RB (Rubber Bearing) por sus siglas en inglés tal como se muestra en la figura 4.3 (Genatios y Lafuente, 2016).

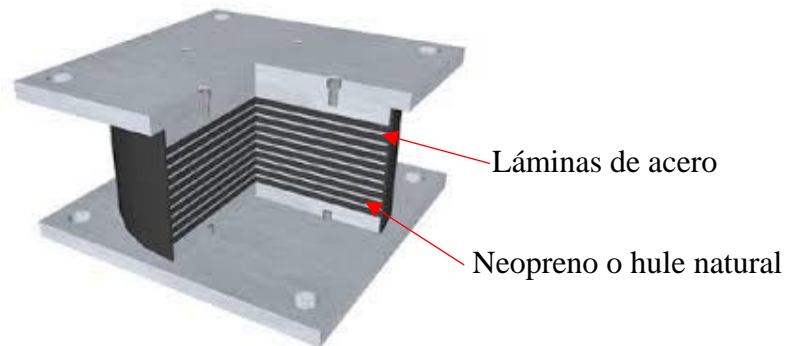


Figura 4.3. Esquema de aislador elastomérico (Fuente: MAGEBA)

Dado que los aisladores deben generar también altos grados de amortiguamiento, se incluyen núcleos de plomo al centro del aislador, que admiten grandes deformaciones, con el propósito de limitar el movimiento relativo y disipar una mayor cantidad de energía. De las principales ventajas que tiene este dispositivo, es la posibilidad de modificar el grado de amortiguamiento con solo variar el diámetro del núcleo de plomo, proporcionando una mayor rigidez inicial y hace que los desplazamientos sean menores antes sismos de intensidades menores. A este tipo de sistema, se le denomina Apoyo Laminado con Núcleo de Plomo o LRB (Lead Laminated Rubber) por sus siglas en inglés, el cual se muestra en la figura 4.4.

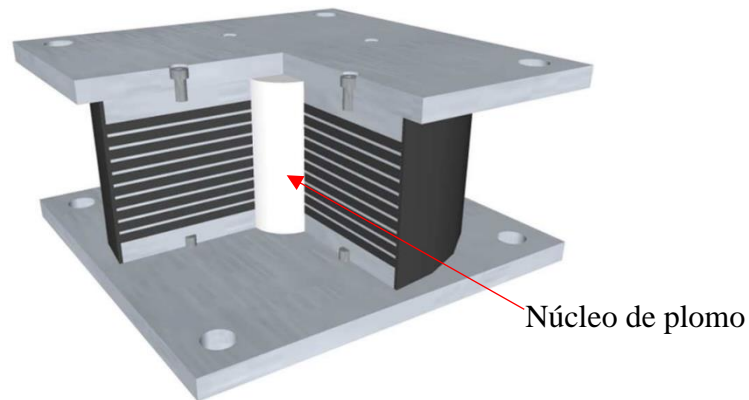


Figura 4.4. Esquema de aislador elastomérico con núcleo de plomo. Fuente: (Fuente: MAGEBA)

Otro tipo de aislador del tipo elastomérico, es el llamado Aislador de alto amortiguamiento HDRB (High Damping Rubber Bearings). Este se compone de capas de neopreno especial, intercaladas con placas de acero, sin embargo, a diferencia del aislador RB, el neopreno se obtiene con la adición de carbono extrafino, aceite negro o resinas que le permiten alcanzar valores más altos de amortiguamiento. El espesor de las capas de caucho varía normalmente entre 8 y 20 mm y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 y 4 mm. Los valores de amortiguamiento de este dispositivo varían entre 10% y 20%.

Para efectos de esta investigación se prestó mayor interés a estos dos tipos de aisladores, el LRB y HDRB.

Aisladores de Deslizamiento

Este dispositivo consiste en una esfera colocada entre dos superficies cóncavas de acero, que al deslizarse produce un movimiento tipo péndulo en la estructura que soporta. Una de las superficies se sujeta a la cimentación y la otra a la estructura. Al presentarse un movimiento en el suelo, la esfera hace que las superficies se desplacen relativamente y es este movimiento, evita que se transmita toda la energía de movimiento de la estructura. En la figura 4.5 se presentan algunos esquemas de este tipo de aislador.

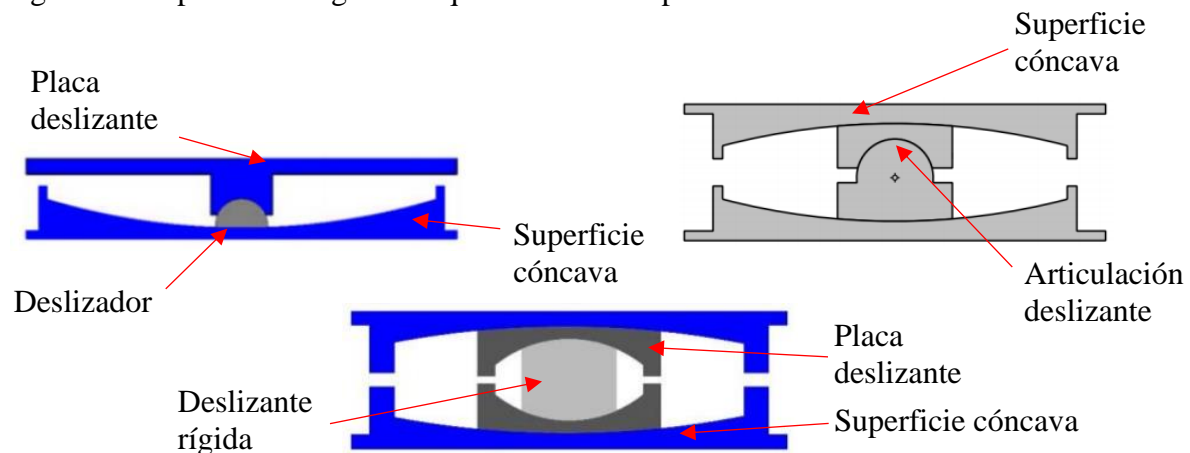


Figura 4.5. Esquema de aislador de deslizamiento. Obtenida de:

<http://dspace.ucuenca.edu>

Este sistema debe producir poca fricción con el propósito de solo transmitir parte de la fuerza de corte, por otro lado, esta misma fricción debe ser suficiente para que fuertes vientos y

sismos pequeños no generen ningún desplazamiento. El periodo de vibración es una función del radio de la curvatura de la superficie cóncava. El amortiguamiento es proporcionado por la fuerza dinámica de fricción, el cual varía de acuerdo con las propiedades del material. Los valores de amortiguamiento que proporciona este aislador varían entre 10% y 30%.

4.3. Bondades del aislamiento sísmico

Partiendo de la consideración que el aislamiento sísmico contribuye a reducir demandas de aceleraciones mediante el incremento del periodo de la estructura, en sitios en donde los espectros de respuesta tienen periodos dominantes cortos, como se muestra en la figura 4.6, representa un gran beneficio para las estructuras rígidas como suelen ser la mayoría de los puentes carreteros. Para lograr este beneficio, el sistema de aislamiento, debe cumplir con ciertas condiciones específicas que de acuerdo con el Manual de Obras Civiles (CFE, 2015), las características deseables de estos sistemas son:

- ✓ Tener capacidad de modificar el periodo, al reducir las ordenadas espectrales sísmicas.
- ✓ Tener suficiente rigidez vertical para soportar acciones permanentes y accidentales.
- ✓ Tener rigidez y resistencia necesaria para limitar desplazamientos laterales en condiciones de servicio
- ✓ Contar con fuerza de auto centrado y recuperación, después de la deformación.
- ✓ Estabilidad vertical y capacidad rotacional en condiciones de servicio.
- ✓ Fuerza de desplazamiento de fluencia.
- ✓ Capacidad de desplazamiento último.
- ✓ No verse afectado significativamente por condiciones ambientales, temperatura o envejecimiento.

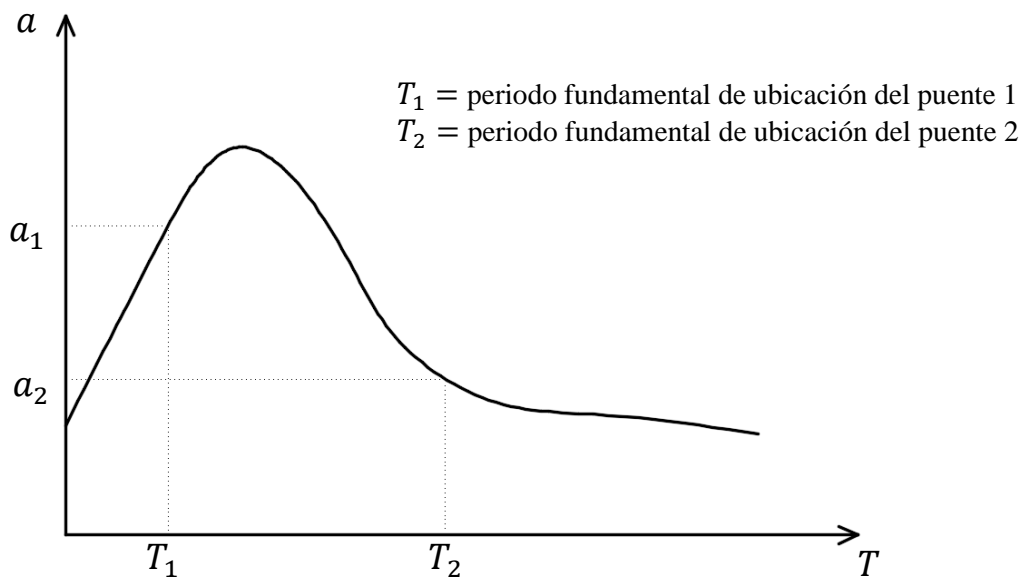
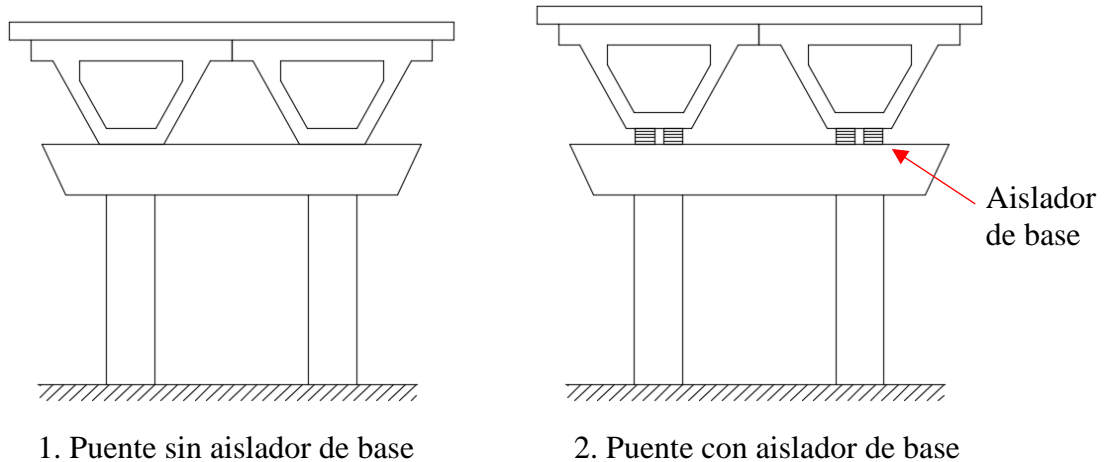


Figura 4.6. Respuesta sísmica de un puente sin aisladores y con aisladores.

Ahora bien, las ventajas que ofrece el sistema de aislamiento de base residen esencialmente en que para sitios en donde el espectro de respuesta se caracteriza por tener la respuesta pico en periodo corto, dicho sistema propicia un incremento del periodo fundamental de la estructura, lo que beneficia en una reducción de las fuerzas a las que está sometido el conjunto estructura-aisladores. Esto a su vez permite una reducción en el desplazamiento relativo entre la superestructura y el nivel de desplante de la subestructura del puente y como consecuencia se reducen las sollicitaciones sobre los elementos. Lo anterior contribuye a reducir los daños

estructurales y efectos de torsión. Así mismo, se puede recuperar la operatividad del puente después de ocurrido un evento sísmico.

Por otro lado, se debe tener en cuenta ciertos aspectos que se deben cuidar en el diseño del sistema de aislamiento, como son los grandes desplazamientos que pueden experimentar éstos. En tal situación habrá que definir la rigidez lateral necesaria para satisfacer la demanda sísmica de desplazamiento. Así mismo es necesario la implementación de un plan de mantenimiento para el puente verificando la zona de aislamiento, cuidando que no presente deformaciones residuales.

4.4. Parámetros de diseño de Aisladores elastoméricos

Como parte del objetivo de esta investigación, se revisarán con mayor detenimiento los parámetros de diseño de los aisladores elastoméricos. Así mismo se revisarán las características mecánicas de dichos aisladores que han sido estudiados por muchas décadas.

Diversos estudios experimentales y analíticos sugieren que es posible utilizar una teoría lineal, como se comenta en el trabajo de Naeim y Kelly (1999), basada en conceptos y predicciones simples durante su diseño (Lucho, 2012).

Algunas de las ecuaciones básicas para definir las propiedades de estos dispositivos fueron tomadas de MDOC (CFE, 2015), tal como se describe a continuación:

Rigidez Lateral

La propiedad mecánica más importante de un aislador elastomérico para el diseño es su rigidez lateral, K dada por:

$$K_H = \frac{GA}{T_r} \quad (4.7)$$

donde,

G = módulo de rigidez al corte del caucho

A = área efectiva en planta de la sección transversal

T_r = altura total de las capas elastoméricas

Amortiguamiento viscoso

De acuerdo con el MOC-CFE (2015), para el amortiguamiento de un aislador laminado, se admitirá una fracción de amortiguamiento del 5%, sin embargo, este valor es comúnmente proporcionado por cada fabricante del dispositivo. Los valores pueden variar del 10% al 16% de amortiguamiento dependiendo del módulo de cortante G .

Factor de forma

Se trata de la relación que existe entre la superficie del área cargada, dividida entre el área perimetral libre de expandirse, esto es, por cada una de las capas internas del caucho. De acuerdo al MOC-CFE (2015), el factor de forma se define como:

$$S_i = \frac{D_b}{4t_i} \quad (4.8)$$

Para un apoyo circular

$$S_i = \frac{B_b L_b}{2t_i(B_b + L_b)} \quad (4.9)$$

Para un apoyo de sección rectangular

donde,

B_b y L_b son anchos y la longitud efectivos del apoyo de caucho en la planta, respectivamente

D_b = diámetro efectivo del apoyo circular

t_i = altura total de las capas elastoméricos

Rigidez vertical

La rigidez vertical $(k)_{vh}$, suele ser un criterio importante para el diseño de los aisladores, este valor se obtiene al sumar las deformaciones por cortante en el caucho, cuya expresión está dada por:

$$(k)_{vh} = \frac{E_c A_r}{T_r} \quad (4.10)$$

donde,

E_c = módulo de compresibilidad efectiva del caucho

A_r = área reducida del caucho

T_r = altura total de las capas elastoméricas

El módulo de compresibilidad efectiva, es función del factor de forma y de las propiedades del material, definido como:

$$E_c = E(1 + 2kS_i^2) \quad (4.11)$$

donde,

E = módulo de elasticidad del material elastomérico

k = constante del material

S_i = factor de forma

El área reducida A_r , es igual al área traslapada entre la cara superior e inferior del apoyo debido al desplazamiento horizontal total de diseño que experimenta el apoyo (Figura 4.7), que en cualquier caso deberá ser menor que B_b .

$$A_r = A_b \left(1 - \frac{x}{B_b}\right) \quad (4.12)$$

Para un apoyo circular

$$A_r = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen}\delta) \quad (4.13)$$

Para un apoyo de sección rectangular

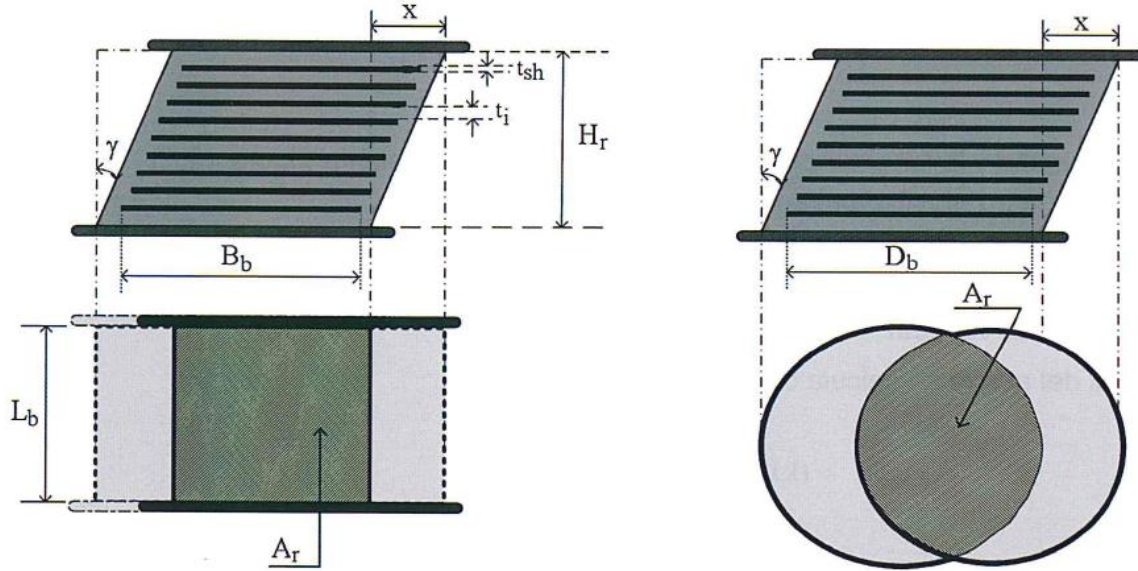
donde,

B_b = ancho efectivo del apoyo

A_b = área efectiva del apoyo en planta

D_b = diámetro efectivo del apoyo circular

δ = factor adimensional que se calcula con $\delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{x}{D_b}\right)$



(a) Apoyo rectangular

(b) Apoyo circular

Figura 4.7 Área efectiva a la compresión de aisladores HRB (CFE, 2015)

Deformaciones Límite

El desplazamiento horizontal (x) está relacionado con la máxima distorsión a corte (γ) conforme a lo siguiente:

$$\gamma = \frac{x}{H_e} \tag{4.14}$$

En este sentido las deformaciones máximas admisibles en los aisladores HDRB, de acuerdo al MOC-CFE (2015) se consideran las siguientes condiciones:

$$(\gamma)_{sc} \leq 2.5 \tag{4.15}$$

$$(\gamma)_{sc} + (\gamma)_{sn} + (\gamma)_{sr} \leq 5.0 \tag{4.16}$$

$$(\gamma)_{sc} + (\gamma)_{ss} + 0.5(\gamma)_{sr} \leq 5.5 \tag{4.17}$$

donde,

$(\gamma)_{sc}$ = deformación angular por cortante debida a compresión.

$(\gamma)_{sn}$ = deformación angular por cortante debida al desplazamiento por efectos no sísmicos, como temperatura, contracción, presfuerzo, flujo plástico, etc.

$(\gamma)_{sr}$ = deformación originada por la rotación del apoyo.

$(\gamma)_{ss}$ = deformación debida al desplazamiento x por efecto sísmico.

Para $S_i \leq 15$

$$(\gamma)_{sc} = \frac{3S_i N}{2A_r G(1+2kS_i^2)} \quad (4.18)$$

Para $S_i > 15$

$$(\gamma)_{sc} = \frac{3N \left(1 + \frac{8GkS_i^2}{E_\infty} \right)}{4GkA_r S_i} \quad (4.19)$$

donde,

E_∞ = módulo de rigidez de compresibilidad volumétrica del hule, generalmente 2000 Mpa.

N = carga vertical máxima de servicio correspondiente a la combinación de cargas correspondiente.

$$(\gamma)_{sr} = \frac{B_b^2 \theta}{2t_i T_r} \quad (4.20)$$

donde,

θ = rotación del apoyo

T_r = suma de los espesores de todas las capas de hule

$$(\gamma)_{ss} = \frac{x}{T_r} \quad (4.21)$$

Capacidad de carga contra el pandeo

Por otro lado, otro parámetro a revisar es la estabilidad del apoyo ante un desplazamiento lateral nulo y ante desplazamiento lateral máximo. Para desplazamiento lateral nulo, la carga crítica de pandeo elástico P_{cr} se obtiene de la ecuación siguiente:

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E_c I G A_b}{3T_r^2}} \quad (4.22)$$

donde,

I momento de inercia mínimo del apoyo de la planta

Para cuando existe desplazamiento lateral, la carga crítica de pandeo es:

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_b} \quad (4.23)$$

Conforme al MOC-CFE (2015) el factor de seguridad que se considera es 3. La carga crítica de pandeo dividida entre este factor, deberá ser mayor o igual a la carga vertical máxima de servicio correspondiente a la combinación de cargas revisada.

De Acuerdo al trabajo de Skinner, Robinson y McVerry (1993) la capacidad a carga vertical se puede estimar con la siguiente expresión:

$$w < A_r G S_i \gamma \quad (4.24)$$

donde,

w = peso permisible sobre el aislador

Conforme a esa misma referencia los valores típicos de $\frac{A_r}{A}$ oscilan entre 0.4 y 0.7.

Mientras que el periodo lateral (T_H) se puede obtener en forma simplificada de la siguiente forma:

$$T_H = 2\pi \left(\frac{S_i H_e \gamma A_r}{A g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.25)$$

donde,

g = aceleración de la gravedad

Con respecto a los parámetros de diseño de los aisladores tipo LRB, Priestley *et al* (1996) considera que al colocar un elemento de plomo con diámetro igual a una cuarta parte de todo el apoyo circular de material elastomérico combinado con láminas de acero, la rigidez inicial del elemento, se verá aumentada 10 veces más. Cabe comentar que este tipo de dispositivos, tienen un comportamiento no lineal respecto a la relación fuerza-desplazamiento dando como resultado un ciclo histerético, que se muestra en la figura 4.8. De esta figura se identifican diferentes parámetros que caracterizan la curva histerética de este tipo de aislador, como son: fuerza de fluencia (F_y), fuerza para un desplazamiento nulo en el ciclo (F_o), rigidez elástica

$(k)_e$, rigidez de postfluencia $(k)_p$, desplazamiento de fluencia (x_y) y desplazamiento máximo (x_m).

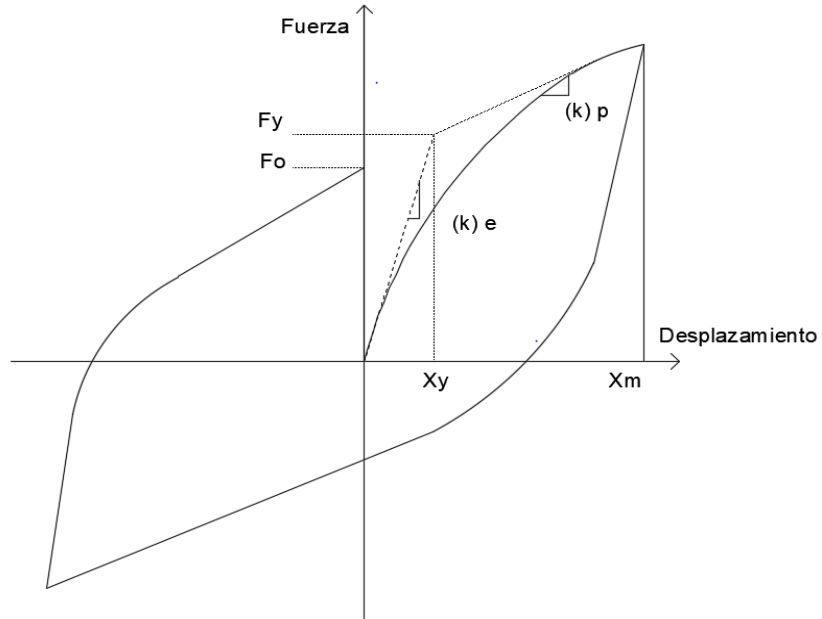


Figura 4.8 Ciclo histérico de un aislador tipo LRB

De acuerdo al MOC-CFE (2015) la ecuación que define la fuerza de fluencia está dada por:

$$F_y = \sigma_y A_{pl} \quad (4.26)$$

donde,

σ_y = esfuerzo de fluencia a cortante del plomo

A_{pl} = área de la sección transversal del núcleo de plomo

La fuerza, F_0 , para el desplazamiento nulo está dada como 0.9 de F_y y la rigidez elástica y la rigidez postfluencia, se calcula con las siguientes ecuaciones

$$(k)_e = \frac{10GA_b}{T_r} \quad (4.27)$$

$$(k)_p = \frac{1.1GA_b}{T_r} \quad (4.28)$$

donde,

A_b = área efectiva del apoyo, sin considerar el área del núcleo de plomo y de acuerdo con estos valores, el desplazamiento de fluencia se define como:

$$x_y = \frac{F_y}{(k)_e} \quad (4.29)$$

Es importante considerar la fuerza de autocentrado, que se refiere a la rigidez postfluencia que deberá tener el conjunto de aisladores después de la ocurrencia de un evento sísmico, la cual se revisa conforme a la siguiente expresión:

$$\Sigma(k)_p \geq 0.05 \frac{W_T}{X_m} \quad (4.30)$$

donde,

W_T = peso total de la estructura en condiciones de servicio

X_m = desplazamiento máximo de los aisladores laminados con núcleo de plomo

Así mismo, un aislador al ser un apoyo formado por diferentes capas suele presentar inestabilidad por pandeo de la misma manera que una columna ordinaria. Se deberá revisar la estabilidad del apoyo ante un desplazamiento lateral nulo, considerando la carga crítica de pandeo elástico (ecuación 4.22). La conexión del apoyo con la estructura definirá la condición crítica de un desplazamiento lateral, dependiendo si puede soportar cortante y momento flexionante o solamente cortante. Cuando exista flexión y cortante, la carga crítica para el apoyo desplazado se calculará con la ecuación 4.22. Si únicamente trabajan a cortante, los apoyos pueden presentar levantamiento parcial y el desplazamiento que los vuelve inestables se calcula con:

$$D_{cr} = \frac{NB_b - F_0 H_r}{N + (k)_p H_r} \quad (4.31)$$

donde,

D_{cr} = desplazamiento crítico de pandeo del aislador

H_r = altura efectiva del aislador

4.5 Métodos de análisis para diseño de aisladores

De acuerdo con el MOC-CFE (2015), menciona cuatro métodos para el análisis de un sistema de aislamiento sísmico de base. Para cada grado de libertad de la estructura, se deberá

determinar su desplazamiento máximo y también el desplazamiento máximo de los dispositivos de aislamiento.

La selección del tipo de análisis a realizar dependerá de la etapa de diseño, el nivel de comportamiento no lineal y la complejidad misma de la estructura, considerando efectos importantes tales como interacción suelo-estructura, geometría y materiales de construcción.

El método de análisis estático lineal es recomendable para fines de prediseño. Se limita a la hipótesis de que la respuesta se debe fundamentalmente al primer modo de vibrar de la estructura. Dado que la estructura se modela en un rango elástico, es necesario la verificación de los elementos de no exceder el rango de los límites de fluencia de los materiales. Las demandas de desplazamiento y fuerza para este método serán obtenidas de espectros de desplazamiento y aceleración, respectivamente, y las ordenadas espectrales estarán en función del periodo efectivo del sistema estructura-aislador, reduciendo el espectro por amortiguamiento. Se considera que el periodo efectivo del sistema estructura-aislador, será el periodo final que poseerá la estructura en conjunto con el sistema de aisladores.

En lo que concierne al método de análisis dinámico lineal se recomienda para estructuras más flexibles o que por su irregularidad, puedan presentar torsión. Las demandas de desplazamiento se obtendrán a partir de espectros de desplazamiento elásticos derivados de espectros de aceleración. Las demandas de fuerza serán obtenidas de espectros de aceleración en función del periodo efectivo de la estructura.

Se deberá hacer una reducción del espectro de diseño por amortiguamiento. El uso del amortiguamiento efectivo estará limitado a los modos de vibrar que se vean afectados por el comportamiento inelástico del aislador.

El método de análisis estático no lineal considera el comportamiento no lineal de los aisladores y de los elementos, con un factor límite de ductilidad de 3.0 y su uso se limita para estructuras definen su respuesta con el modo fundamental de vibración. El máximo desplazamiento o fuerza que se aplicará en el análisis por este método será de 1.5 veces el máximo para el sistema estructural, tomando como límite los desplazamientos máximos para una ductilidad de 4 y estos deberán ser incrementados hasta alcanzar el mecanismo del colapso, caracterizado por la formación de articulaciones plásticas en la base de las columnas.

El método de análisis dinámico no lineal paso a paso es recomendado para analizar estructuras de gran importancia y estructuras de ductilidades superiores a 1.5, sistemas altamente asimétricos, estructuras ubicadas en terrenos flexibles con velocidades de onda de cortante <400 m/s y periodos de suelo superiores a 1 segundo. Por otro lado, se recomienda el uso de este análisis para el diseño definitivo de los aisladores dado el carácter no lineal de la mayor parte de los aisladores de base.

Para poder aplicar correctamente este procedimiento, se recomienda el uso de al menos cuatro pares de acelerogramas horizontales de eventos sísmicos, teniendo estos, congruencia en la duración de los acelerogramas y deberán ajustarse lo más posible al espectro de sitio de normas asegurando así, un mismo nivel de peligro sísmico.

Dadas las restricciones de cada uno de los métodos que se mencionan, para el análisis estructural del puente de estudio, se limitó a usar el método modal espectral.

5. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO

5.1 Criterios básicos para el diseño sísmico de puentes con base aislada

Pese a que existe bastante información en la literatura técnica sobre el tema de aislamiento sísmico, como se ha comentado en capítulos anteriores, en México existe incertidumbre sobre el uso de dichos dispositivos, en parte se atribuye a que no se ha dado amplia difusión sobre su empleo a pesar de que se cuenta con algunas estructuras con base aislada; en la ciudad de México se tienen un hotel en la zona de Vallejo y un hospital en la zona de Tláhuac; mientras que en la Riviera Nayarit se tiene un Centro Vacacional (Fuentes, 2020). Otro aspecto que lleva a la indecisión sobre la aplicación del aislamiento sísmico es la poca comprensión de los criterios básicos de diseño y su aplicación acertada en los puentes por un mayor número de ingenieros dedicados al proyecto estructural de estas obras de infraestructura.

Con la intención de incentivar el uso de los aisladores de base en puentes, en este capítulo se propone un procedimiento de diseño simplificado y explícito, que permita establecer los puentes candidatos para incorporarles aislamiento sísmico, en función de las propiedades dinámicas del puente y del suelo. Así mismo, se pretende que este procedimiento guíe al proyectista en la elección adecuada del tipo de aislador de base acorde a los que se fabrican en el mercado.

De acuerdo con Sullivan *et al.* (2003) para que un procedimiento de diseño sísmico garantice su aplicación y aceptación por los ingenieros proyectistas, debe caracterizarse por su simplicidad, claridad y versatilidad. La simplicidad implica que el procedimiento se puede aplicar de manera rápida y sin complicaciones. La claridad se refiere a la información

necesaria para que el ingeniero sea capaz de aplicar dicho procedimiento sin hacer demasiadas suposiciones. Mientras que la versatilidad se vincula con la flexibilidad y diversidad de criterios para evaluar las demandas sísmicas. Con base en estas consideraciones se procedió a proponer un procedimiento de diseño sísmico de puentes carreteros con base aislada.

Los criterios esenciales de este procedimiento de diseño radican en los siguientes aspectos: estimación del periodo fundamental del puente con base fija T_F , identificación del periodo pico en los espectros de respuesta T_p , modelación y análisis sísmico del sistema estructural con aislamiento sísmico y definición de las propiedades geométricas y mecánicas de los aisladores de base que satisfagan los niveles de desempeño del puente.

El conocer los periodos referidos T_F y T_p es un principio básico para valorar si el puente es candidato a ser objeto de un aislamiento sísmico, a fin de mover la estructura del puente a una región espectral con menos demanda sísmica de aceleración, como se ha comentado anteriormente.

Para afinar la propuesta de los aisladores sísmicos es importante la moderación y el análisis de la respuesta sísmica del sistema estructural con la inclusión de estos dispositivos, con objeto de revisar que los aisladores no superen las deformaciones permisibles que comprometan la seguridad sísmica del puente, así también para vigilar el cumplimiento de los niveles de desempeño de toda la estructura del puente.

En lo que respecta a la revisión del diseño sísmico del puente basado en conceptos de desempeño, se tomó como referencia los trabajos de Lehmom y Moehle (2000), Rivera (2005) y Rivera *et al.* (2019), a fin de tener una referencia sobre la definición de los niveles de desempeño para puentes de concreto reforzado.

Partiendo de la concepción de que las columnas de los puentes son elementos resistentes clave en el comportamiento sísmico global en este tipo de obras, los niveles de desempeño

sísmico se pueden describir de acuerdo con Rivera *et al.* (2023) con los parámetros que se indican en la tabla 6.

Tabla 6. Definición de los niveles de desempeño sísmico en puentes.

Nivel de desempeño	γ permisible menor que:	Nivel de daño	Nivel de ocurrencia
Operación completa	0.001	<ul style="list-style-type: none"> • Nulo • No requieren reparación las columnas. 	Ocasional
Operación parcial	0.010	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de grieta de hasta 0.25 mm. • Pérdida de rigidez lateral del orden de 25%. • Reparación con resinas epóxicas. 	Raro
Seguridad de vida	0.020	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de recubrimiento • Pérdida de rigidez lateral hasta un 40% • Requiere refuerzo de la estructura. 	Muy raro

Ahora bien, partiendo de la importancia de los puentes en la red del sistema carretero, de acuerdo al Instituto Mexicano del Transporte (IMT), establece ciertos puentes con mayor importancia por conformar parte de la red primaria y que se les identifica como tipo I (N.PRY.CAR.6.φ1.φ φ4/ φ1). Por la gran relación que tienen este tipo de puentes, se considera importante el uso de aisladores de base, por lo que para garantizar su buen desempeño sísmico ante diferentes escenarios sísmicos será vital que cumplan con los dos primeros niveles de desempeño descritos en la tabla 6, es decir, operación completa y operación parcial.

5.2 Descripción del procedimiento de diseño

La propuesta de procedimiento de diseño sísmico de puentes con aislamiento sísmico puede sintetizarse en un diagrama de flujo, mismo que se muestra en la figura 5.1. A continuación se hará una descripción de cada uno de los pasos a seguir conforme a dicho diagrama de flujo.

5.2.1. Predimensionamiento del puente y periodo fundamental con base fija (T_f)

Como en todo proyecto estructural se debe tener una noción sobre las posibles dimensiones geométricas de los principales elementos estructurales, conforme a los criterios básicos de estructuración, con miras a proveer al puente de la resistencia necesaria por carga gravitacional y carga lateral sísmica.

En el caso de la superestructura, los parámetros fundamentales para pre dimensionar sus elementos resistentes son el claro y la magnitud de la carga móvil que transitará en el puente, para ello se consideran las recomendaciones que hacen normas internacionales y nacionales, tales como: AASHTO (2012) y IMT-SCT (2004).

En cuanto a la definición de las características de la subestructura que en el caso particular de este trabajo de investigación se están considerando pilas o columnas que forman marcos en la dirección transversal, los aspectos básicos a considerar son las cargas muertas y móviles, en combinación con las demandas sísmicas conforme a la zona sísmica y características del terreno en donde esté desplantado el puente, considerando base empotrada. Para la estimación de las demandas sísmicas se suele recurrir al MDOC (CFE,2016), teniendo como opciones el recurrir a un espectro específico de sitio o un espectro de diseño sísmico regional.

Con base en los criterios de diseño anteriormente comentados se obtienen las dimensiones preliminares del sistema estructural del puente, al cual se le denominará Modelo 1 o estructura empotrada. De dicho modelo se obtiene el periodo fundamental del puente (T_f).

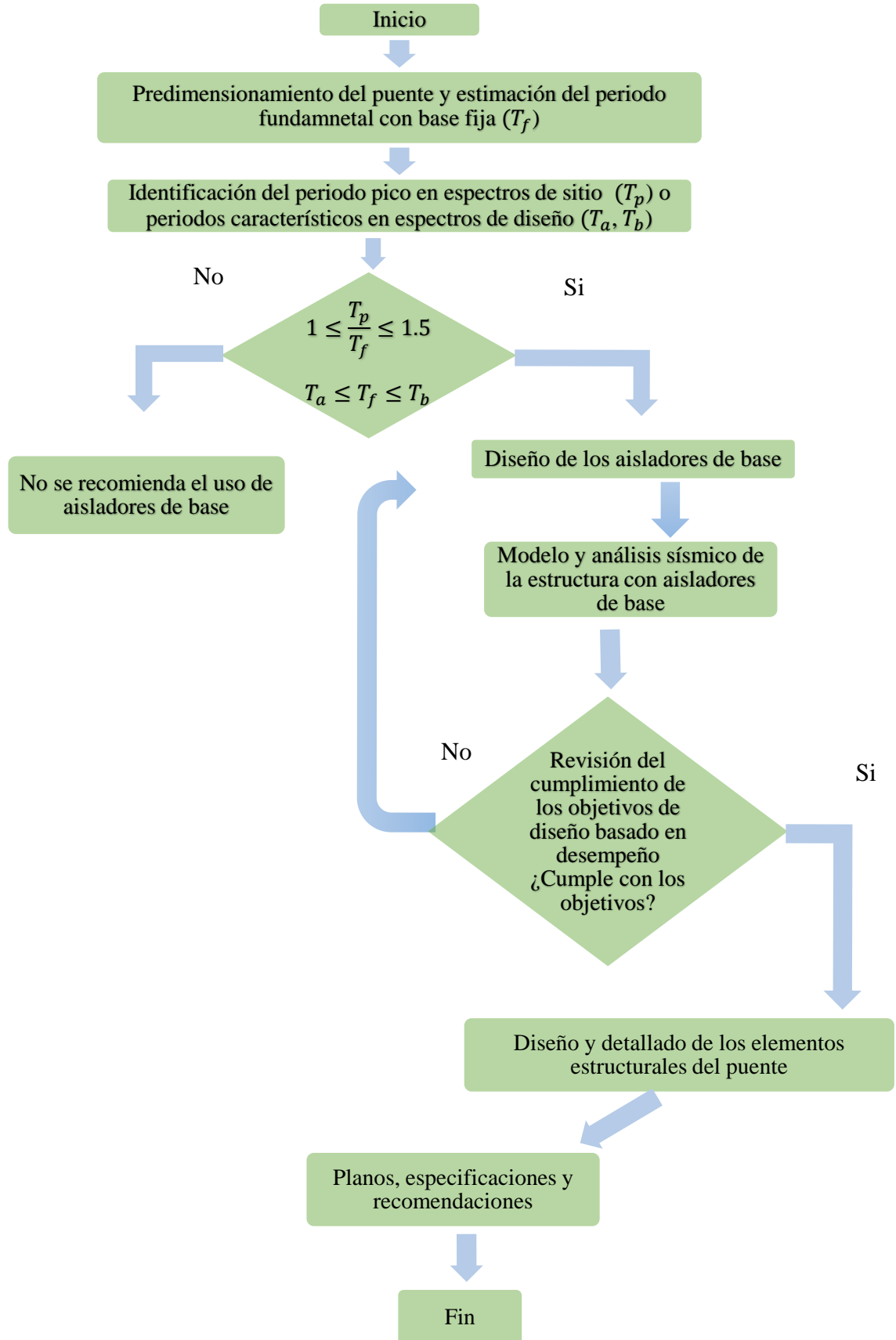


Figura 5.1 Procedimiento de diseño sísmico de puentes con base aislada

5.2.2. Identificación del periodo pico en espectros de sitio (T_p) o periodos característicos en espectros de diseño (T_a, T_b)

En esta fase del procedimiento de diseño se busca identificar los parámetros básicos para definir la viabilidad del uso de los aisladores de base, para ellos es fundamental contrastar el periodo fundamental del puente (T_f) con el periodo pico de (T_p) o los periodos característicos (T_a, T_b).

Lo deseable en este tipo de proyectos es donde se quiere incorporar dispositivos de control de la respuesta dinámica como el aislamiento sísmico que permiten evaluar la tasa media de excedencia de una intensidad sísmica, considerando diferentes fuentes sísmicas. Así mismo sería deseable contar con espectros asociados a sismos de intensidad extraordinaria, sismos como los de 1985 y 2017, no obstante, otra posibilidad es la que recomienda el MDOC (CFE, 2015) con respecto a la construcción de espectros específicos de sitio. En cualquiera de estas circunstancias es fundamental identificar el periodo pico del espectro de sitio (T_p), con objeto de valorar el nivel de amplificación en la demanda sísmica en la estructura dentro de dicha región espectral.

En el caso de emplear espectros regionales de diseño sísmico, se delimita nuevamente la meseta con sus respectivos periodos característicos (T_a, T_b), en los cuales se establece la zona espectral en los que se tiene mayor demanda sísmica. Cabe comentar que este tipo de espectros suelen ser muy conservadores, tanto en la amplificación de la demanda sísmica como en la extensión de la meseta del espectro, siendo este último aspecto un impedimento, en algunos casos, para justificar el uso de aisladores de base en los puentes. Por lo anterior, se recomienda en la mayoría de las veces emplear espectros específicos de sitio para obtener reducciones racionales.

5.2.3. Toma de decisión sobre el uso de aisladores de base

Una vez definidos el periodo fundamental del puente (Modelo 1, T_f), así como el periodo pico (T_p) o periodos característicos (T_a, T_b), se procede a juzgar sobre la pertinencia del uso del sistema de aislamiento sísmico. Para ello se valora que la estructura del puente con T_f se

alejado de la zona espectral de mayor demanda sísmica, dado que el aislamiento sísmico da lugar al alargamiento del periodo de vibración del sistema estructural con base aislada, lo cual se traduce en una menor demanda de aceleración espectral.

En el caso de emplear espectros específicos de sitio, se recomienda usar aisladores de base si la relación T_p/T_f oscila entre 1 y 1.5, tal como se muestra en la Figura 5.1. Esta recomendación se sustenta en la posible variación del periodo de vibración de la estructura (T_f) ante la pérdida de rigidez lateral por la excitación sísmica, como se ha podido medir en ensayos sísmicos de columnas de puentes (Rivera *et al.*, 2019). En este sentido, cuando las columnas de los puentes pierden un 25% de rigidez lateral, cuando fluye el acero de refuerzo, el periodo de la estructura original del puente se alarga y aunque éste sea previamente menor que T_p , puede llegar a ser cercano al mismo bajo una relación $\frac{T_p}{T_f} = 1.5$. Mientras que en el caso en que $\frac{T_p}{T_f} = 1$, pese a que T_f sufra un alargamiento por la degradación de rigidez estaría todavía en la región espectral de mayor demanda sísmica (Figura 5.2).

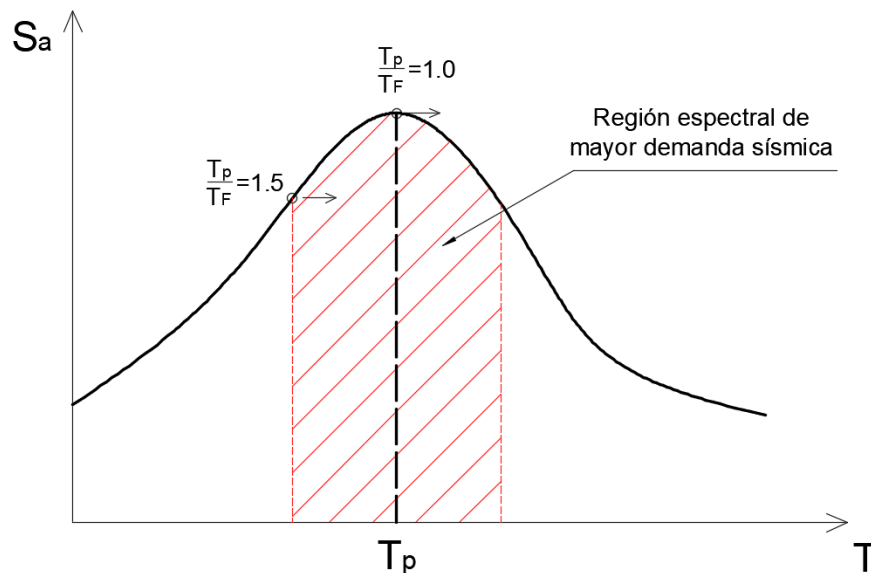


Figura 5.2. Viabilidad del uso de aisladores en puentes en función de los valores T_p y T_f , cuando se emplea un espectro específico de sitio.

En tanto, con los espectros regionales de diseño sísmico se justifica el empleo de los aisladores de base en puentes cuando T_f se encuentra entre los periodos característicos T_a y T_b , tal como se observa en la Figura 5.3.

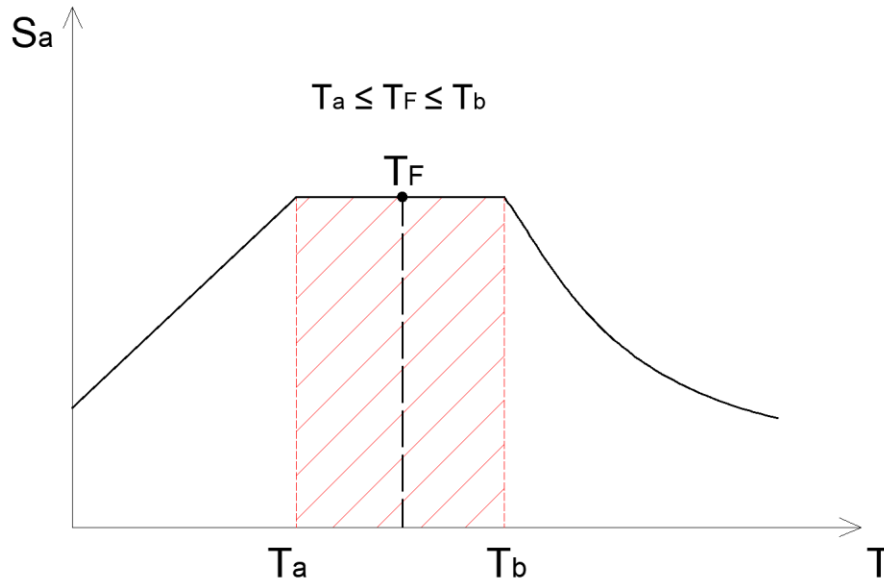


Figura 5.3. Viabilidad del uso de aisladores en puentes en función de los valores T_f y T_a y T_b , cuando se emplea un espectro regional de diseño sísmico.

En el caso de optar por el uso de aisladores de base en el puente, se procederá al diseño de los mismos como se comentará en el siguiente subcapítulo. Previo a ello, es importante conocer los aisladores disponibles en el mercado, así como sus características y propiedades, las cuales se describen a continuación; considerando los tipos de aisladores objeto de esta investigación.

Dentro del mercado del aislamiento sísmico, diferentes empresas ofrecen distintos productos de aisladores elastoméricos, los cuales se resumen en la siguiente tabla, con base en información proporcionada en sus sitios web y especificaciones técnicas.

Tabla 7. Características de aisladores elastoméricos de base, según diversos fabricantes.

Fabricante	Dispositivos en el mercado	Características
Freyssinet	ISOSISM LRB	Existen dos tipos generales de acuerdo con sus valores del módulo G de corte que son 0.4 y 0.8 MPa.
	ISOSIM HDRB	De acuerdo con sus valores del módulo G de corte y amortiguamiento que son 0.4, 0.8 y 1.4 MPa, para un amortiguamiento de 10%, 10% y 16%, respectivamente.
Mageba	LASTO LRB	Aislador elastomérico con núcleo de plomo, para rigidez inicial y amortiguamiento desde 25 hasta 30%. Los diámetros de dicho dispositivo van de 500 a 1000 mm.
	LASTO HDRB	Amortiguamiento de hasta 16 %. Los diámetros de este dispositivo varían de acuerdo con el desplazamiento sísmico de diseño y la rigidez del dispositivo.
Maurer	MLDRB	Dispositivo formado por capas de caucho separadas por hojas de acero vulcanizado. La disipación de energía es pobre por lo que amortiguadores adicionales son necesarios para aumentar la amortiguación estructural y disminuir la estructura.
	MHDRB	Relaciones de amortiguación efectivas que oscilan entre 6% y 10%. Pueden combinarse con amortiguadores adicionales para reducir desplazamientos en movimientos sísmicos fuertes.
	MLRB	Los parámetros varían entre 0.4 a 1.35 N/mm ² de módulo de cortante, amortiguamiento efectivo entre 15 a 35 % y dimensiones hasta de 1200 mm largo-ancho o diámetro.

5.2.4. Diseño de los aisladores de base

Para el inicio del diseño de los aisladores de base se parte de la información comentada en el inciso 5.2.2, además de conocer el nivel de carga axial que recibirán los aisladores (w). Con esta información se parte de un proceso iterativo en el cual se proponen tres valores: factor de incremento del periodo de vibración del sistema con aislamiento (η_{obj}) y los amortiguamientos del aislamiento (ξ_a) como del sistema estructura-aislador (ξ_{sis}). Con los parámetros anteriores se obtienen las dimensiones del aislador.

Dichas dimensiones se deberán redondear o adaptar para fines constructivos, y con ello recalculan las propiedades del dispositivo.

La propuesta del aislador se realizará con un espectro elástico, ya sea de diseño, de sitio o de respuesta. En el caso de usar un espectro de diseño, el factor de comportamiento sísmico será $Q=1$, mientras que el factor de sobre-resistencia se tomará $R=1$, es decir el aislador se diseñará con un espectro transparente.

A continuación, se describen los pasos básicos a seguir para el diseño de los aisladores de base en puentes.

- Periodo de vibración objetivo (T_o)

$$T_o = \eta_{obj} T_F \quad (5.1)$$

$$w_o = \frac{2\pi}{T_o} \quad (5.2)$$

donde, T_F es el periodo de la estructura del puente con base fija, mientras que w_o representa la frecuencia circular del sistema aislado.

- Periodo del sistema de aislamiento requerido (T_a)

Considerando que la superestructura del puente que se va a aislar es rígida, se tiene que el desplazamiento total del sistema (D_T) será igual al desplazamiento del aislador (D_a) sumado al desplazamiento de las pilas o columnas (D_C), tal como se ilustra en la figura 5.4, por tanto:

$$D_T = D_a + D_C \quad (5.3)$$

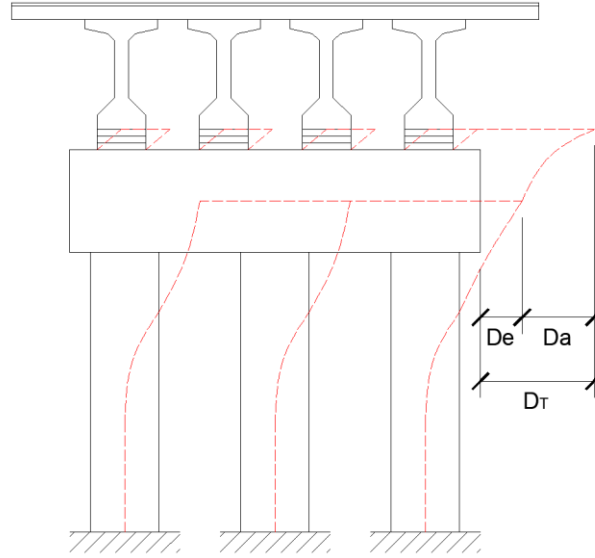


Figura 5.4. Desplazamiento en la estructura del puente aislado.

Por lo anterior, el periodo del sistema con aislamiento (T_{sa}) se puede expresar como:

$$T_{sa} = T_a^2 + T_F^2 \quad (5.4)$$

donde, $T_{sa} = T_o$

De la ecuación anterior se puede obtener el periodo del aislador (T_a), dado por:

$$T_a = \sqrt{T_{sa}^2 - T_F^2} \quad (5.5)$$

$$w_a = \frac{2\pi}{T_a} \quad (5.6)$$

- Rigidez efectiva total (K_{et})

La rigidez efectiva total de los aisladores se relaciona con la masa total de la superestructura (M_s), asumiendo que la masa del aislador es pequeña, se tiene:

$$K_{et} = M_s w_a^2 \quad (5.7)$$

$$M_s = \frac{w_s}{g} \quad (5.8)$$

donde, w_s es el peso total de la superestructura del puente.

- Rigidez de un aislador (K_{ea})

Asumiendo que la carga se distribuye equitativamente en cada aislador se obtiene:

$$K_{ea} = \frac{K_{et}}{n_a} \quad (5.9)$$

donde, n_a se refiere al número de aisladores.

- Desplazamiento de la estructura con el periodo objetivo

Para este cálculo se deben usar los amortiguamientos del sistema (ξ_{sis}) y amortiguamiento del aislamiento (ξ_a), que inicialmente se proponen, como se mencionó al principio de este apartado, que posteriormente serán recalculados hasta obtener un diseño preliminar del aislador y después de algunas iteraciones, el diseño final.

Partiendo de la expresión para calcular la pseudoaceleración espectral (s_a) en función del desplazamiento (D), que de acuerdo con Chopra (2001), se obtiene con:

$$s_a = w^2 D \quad (5.10)$$

Así, la demanda de desplazamiento total (D_T) considerando un espectro de diseño con 5 % de amortiguamiento, para el periodo T_{sa} , sería:

$$D_T = s_a \frac{T_{sa}^2}{4 \pi^2} \quad (5.11)$$

Si se considera el amortiguamiento suplementario mayor que 5% conforme a las NTC-Sismo (2020) o el Manual de Obra Civiles (CFE, 2015), con el factor β , la ecuación 5.11 queda:

$$D_T = \beta s_a \frac{T_{sa}^2}{4 \pi^2} \quad (5.12)$$

En el caso de emplear un espectro de respuesta para un acelerograma determinado, se calcula dicho espectro en términos de desplazamiento para el valor del amortiguamiento suplementario (β) comentado anteriormente, para efectos de estimar la demanda de desplazamiento (D_T).

- Desplazamiento del aislador (D_a)

$$D_a = D_T \left(\frac{T_a^2}{T_{sa}^2} \right) \quad (5.13)$$

- Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_D)

Considerando aisladores con núcleo de plomo, el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento (ξ_a) se puede obtener con la siguiente expresión:

$$\xi_a = \frac{E_D}{2 \pi K_{ea} D_a^2} \quad (5.14)$$

Mientras que la energía disipada (E_D), está dada por:

$$E_D = 2 \cdot \pi \cdot K_{ea} \cdot D_a^2 \cdot \xi_a \quad (5.15)$$

- Desplazamiento de fluencia (D_y) y rigidez de postfluencia (K_2)

Tomando como referencia la figura 5.5 que muestra el ciclo histérico bilineal idealizado para un aislador con núcleo de plomo, se pueden identificar los parámetros necesarios para obtener (D_y) y (K_2).

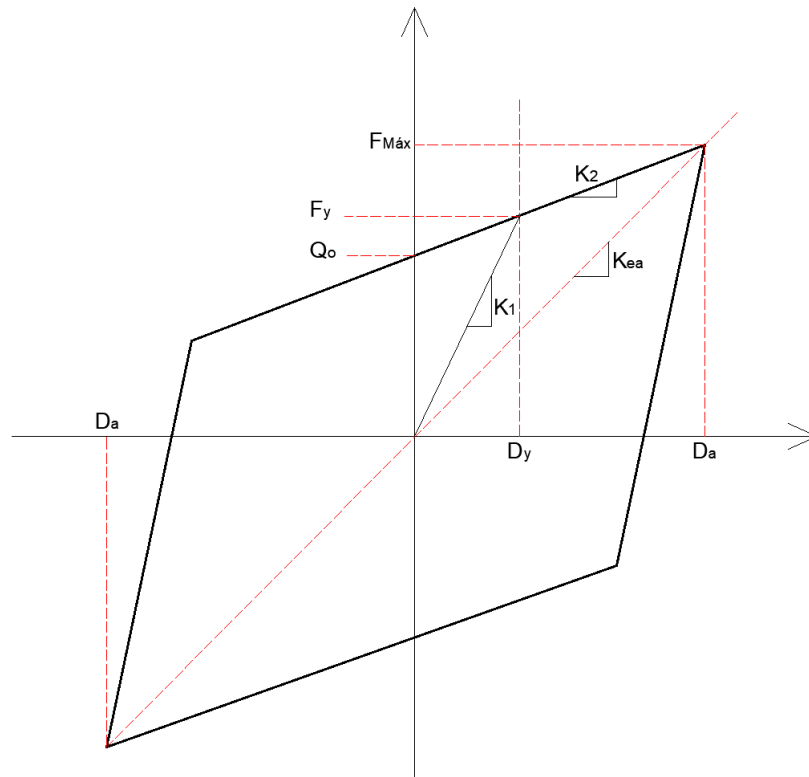


Figura 5.5. Diagrama de un ciclo de histéresis para un aislador con núcleo de plomo.

La fuerza Q_o se obtiene con la expresión que propone Naeim y Kelly (1999), dada por:

$$Q_o = \frac{E_D}{4(D_a - D_y)} \quad (5.16)$$

Mientras que la rigidez de la postfluencia (K_2) se obtiene con

$$K_2 = K_{ea} - \frac{Q_o}{D_a} \quad (5.17)$$

Para el cálculo del desplazamiento de fluencia (D_y) se parte de las siguientes consideraciones:

De acuerdo con Naeim y Kelly (1999), $K_1 = 10K_2$, si además se considera que:

$$F_y = K_1 D_y = 10K_2 D_y \quad (5.18)$$

De la figura 5.5, se deduce:

$$\begin{aligned} Q_o &= F_y - K_2 D_y \\ Q_o &= 10K_2 D_y - K_2 D_y \\ Q_o &= 9K_2 D_y \end{aligned}$$

Por lo que:

$$D_y = \frac{Q_o}{9K_2} \quad (5.19)$$

Ahora bien, para obtener los valores definitivos de D_y y K se entra en un proceso iterativo, de tal forma que el valor de D_y obtenido con 5.19 se sustituye en 5.16 para recalcular los valores de Q_o , K_2 , K_1 , y D_y hasta obtener el mismo valor al final del proceso.

- Fuerza de fluencia

$$F_y = Q_o + K_2 D_y \quad (5.20)$$

- Diámetro del núcleo de plomo

El área del plomo (A_p) se obtiene con:

$$A_p = \frac{Q_o}{\tau_p} \quad (5.21)$$

donde, τ_p es el esfuerzo cortante de fluencia del plomo.

Mientras que el diámetro del núcleo de plomo (ϕ_p) se deduce a partir de:

$$\phi_p = \sqrt{\frac{4 A_p}{\pi}} \quad (5.22)$$

- Área del caucho

Dado que el aislador se desliza durante un sismo y el área para soportar la carga se reduce, queda un área menor (figura 5.6) se propone el diámetro total (ϕ_T) igual a:

$$\phi_T = 3 D_{max} \quad (5.23)$$

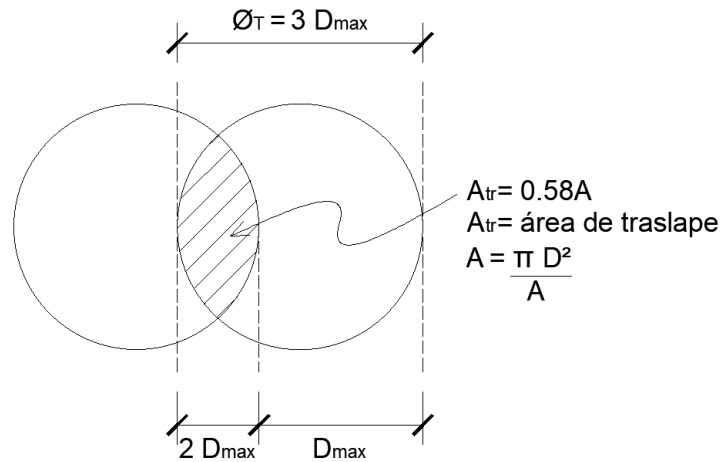


Figura 5.6. Área de traslape del apoyo desplazado para un aislador circular.

Para aumentar la seguridad del sistema de aislamiento, se incrementa un 50% el desplazamiento de diseño, por lo que el desplazamiento máximo será:

$$D_{max} = 1.5 D_a \quad (5.24)$$

Para el área del caucho, se tiene que:

$$A_T = A_p + A_r \quad (5.25)$$

donde, A_T es el área total del aislador y A_r es el área del caucho, por lo que:

$$A_r = A_T - A_p \quad (5.26)$$

- Cálculo del espesor de caucho

Tomando en consideración la rigidez de postfluencia K_2 conforme a Naeim y Kelly (1999), se tiene:

$$K_2 = \frac{G_r A_r}{h_r} \quad (5.27)$$

El espesor del caucho h_r es:

$$h_r = \frac{G_r A_r}{K_2} \quad (5.28)$$

donde, G_r representa el módulo de cortante del caucho.

- Propiedades del aislador con las dimensiones propuestas

Con la propuesta de diámetro del núcleo de plomo, diámetro total del aislador y espesor del plomo, las propiedades antes obtenidas deben recalcularse de forma inversa con objeto de obtener los valores con el amortiguamiento del aislador y del sistema real. La secuencia de cálculo se describe a continuación:

$$K_1 = \frac{10 G_r A_r}{h_{real}} \quad (5.29)$$

$$K_2 = \frac{K_1}{10} = 0.1 K_1 \quad (5.30)$$

$$Q_o = A_p \tau_p \quad (5.31)$$

$$D_y = \frac{Q_o}{9 K_2} \quad (5.32)$$

$$F_y = Q_o + K_2 D_y \quad (5.33)$$

$$K_{ea} = K_2 + \frac{Q_o}{D_a} \quad (5.34)$$

$$K_{et} = \eta_a K_{ea} \quad (5.35)$$

Con los valores calculados es posible obtener el amortiguamiento del aislador con las ecuaciones del MDOC-CFE (2015) dadas por:

$$\xi_{his} = \frac{2(1-\alpha)\left(1-\frac{1}{\mu}\right)}{\pi(1+\alpha(\mu-1))} \quad (5.36)$$

$$\xi_a = \xi_{his} + \xi_v \quad (5.37)$$

donde, ξ_a es el porcentaje de amortiguamiento del aislador, ξ_{his} representa el porcentaje de amortiguamiento histerético y ξ_v es el porcentaje de amortiguamiento viscoso.

El amortiguamiento viscoso del caucho se considera nulo, por lo que:

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \quad (5.38)$$

$$\mu = \frac{D_a}{D_y} \quad (5.39)$$

Para el cálculo del amortiguamiento del sistema ξ_{sis} con base en la ecuación del MDOC-CFE (2015), se tiene:

$$\xi_{sis} = \frac{\xi_a + \frac{\xi_{es} K_{et}}{K_{es}}}{1 + \frac{K_{et}}{K_{es}}} \quad (5.40)$$

donde, K_{es} es la rigidez de la estructura como cuerpo rígido, la cual se obtiene aplicando una fuerza en la superestructura del puente con base rígida.

$$K_{es} = \frac{v}{\Delta} \quad (5.41)$$

mientras que, $\xi_{es} = 0.05$, amortiguamiento convencional de la estructura.

Se obtiene la energía disipada en un ciclo de histéresis:

$$E_D = 4 Q_o (D_a - D_y) \quad (5.42)$$

verificando con la ecuación dada por:

$$E_D = 2 \pi K_{ea} D_a^2 \xi_a \quad (5.43)$$

Periodo y frecuencia del sistema de aislamiento

$$w_a = \sqrt{\frac{K_{et}}{M_s}} \quad (5.44)$$

$$T_a = \frac{2\pi}{w_a} \quad (5.45)$$

Periodo del sistema estructura-aislador

$$T_{sa} = \sqrt{T_a^2 + T_F^2} \quad (5.46)$$

Con el nuevo periodo del sistema se recalculan los valores del coeficiente por el cual se multiplica el periodo de la estructura fija para obtener el periodo del sistema η_{obj} . Con este valor, y los resultados del amortiguamiento del sistema y del aislador, se inicia la siguiente iteración hasta que coincidan los valores.

Se recomienda la utilización de herramientas de cálculo que permitan automatizar el proceso con el fin de ser capaces de realizar con mayor facilidad las iteraciones necesarias.

Al proponerse las dimensiones para el aislador, estas deberán mantenerse durante todo el proceso iterativo. En la tabla 8 se muestra el proceso de cálculo para las iteraciones.

Tabla 8. Proceso de cálculo en las iteraciones

Iteración	η_{obj}	K_{ea}	ξ_{sis}	ξ_a	T_{sa}	T_a	D_T	D_a	D_y	E_D	K_1	K_2
1												
2												
3												
4												

Nota: El proceso iterativo termina hasta que en las últimas iteraciones, los valores no cambien.

- Datos para el análisis estructural

Rigidez vertical (k_v) e acuerdo con Naeim y Kelly (1999):

$$k_v = \frac{E_c A_{tr}}{h_r} \quad (5.47)$$

donde, E_c es el módulo de compresión del caucho-acero bajo el nivel especificado de carga vertical, A_{tr} representa el área del traslape del apoyo, cuando se desplaza horizontalmente.

$$E_c = 6 \lambda G_r S_i^2 \quad (5.48)$$

$$S_i = \frac{\phi_T}{4t_{ri}} \quad (5.49)$$

$$t_{ri} = \frac{h_r}{n_c} \quad (5.50)$$

n_c = número de capas del apoyo

$$\lambda = \frac{b^2 + a_p^2 - \left[\frac{(b^2 - a_p^2)}{\ln\left(\frac{b}{a_p}\right)} \right]}{(b - a_p)^2} \quad (5.51)$$

$$a_p = \frac{\phi_p}{2} \quad (5.52)$$

$$b = \frac{\phi_T}{2} \quad (5.53)$$

$$A_{tr} = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen } \delta) \quad (5.54)$$

$$D_b = \phi_T - 2 t_{borde} \quad (5.55)$$

t_{borde} = recubrimiento horizontal a la placa de acero

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{D_{max}}{D_b} \right) \quad (5.56)$$

Para las direcciones horizontales se deberá tener la rigidez K_{ea} y el amortiguamiento efectivo en el dispositivo el cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$c = 2 \xi_a w_a m_a \quad (5.57)$$

$$w_a = \frac{2\pi}{T_a} \quad (5.58)$$

m_a = masa actuando en un aislador

ξ_a = porcentaje de amortiguamiento del sistema de aislamiento propuesto

Se deberá verificar el valor de c con la ecuación:

$$E_D = 2 \pi K_{ea} D_a^2 \xi_a \quad (5.59)$$

Recordando que:

$$w_a^2 = \frac{K_{ea}}{m_a} \quad (5.60)$$

$$K_{ea} = w_a^2 m_a \quad (5.61)$$

$$\xi_a = \frac{E_D}{2 \pi w_a^2 m_a D_a^2} \quad (5.62)$$

Por lo que, de acuerdo con Chopra (2001) se tiene:

$$2 \xi_a w_a m_a = \frac{E_D}{\pi w_a D_a^2} \quad (5.63)$$

$$c = \frac{E_D}{\pi w_a D_a^2} \quad (5.64)$$

En consecuencia, las propiedades a utilizar en el modelo matemático de análisis se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades de los aisladores a utilizar en el modelo matemático de análisis.

Propiedades	Parámetros
Lineales	k_v
	K_{ea}
	c
No lineales (Direcciones horizontales)	K_1
	F_y
	K_2

5.2.5. Modelo y análisis sísmico de la estructura con aisladores de base

Con base en los datos obtenidos para el análisis se procede a definir el esquema de modelación de los aisladores en algún programa de análisis estructural. En el caso particular del programa SAP2000, que fue empleado en este trabajo, se usan elementos LINK del tipo “Ruber Isolator” al cual se le asignan las propiedades lineales y no lineales en las direcciones locales U2 y U3 (Tabla 9).

De acuerdo con Priestley *et. al.* (1996), el esquema de modelación del resto de la estructura se puede basar en elementos barra para el caso de las pilas o columnas con la consideración de la rigidez agrietada (rigidez secante a la fluencia), en tanto la cubierta puede ser simulada con elementos barra o elementos placa, según las características de la misma, sin considerar rigidez agrietada, en razón de que, en la filosofía de diseño sísmico de los puentes, la cubierta debe permanecer bajo comportamiento elástico.

Ahora bien, debido a que los programas comerciales de análisis no permiten seleccionar diferentes amortiguamientos para diferentes elementos, se ve factible hacer una corrección al espectro de respuesta o de diseño (Priestley *et. al.*, 1996). Esta corrección se basa en la

observación de que el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento es efectivo solamente para periodos largos. Por consiguiente, la modificación del espectro bajo este principio se realiza conforme al procedimiento que se ilustra en la Figura 5.7.

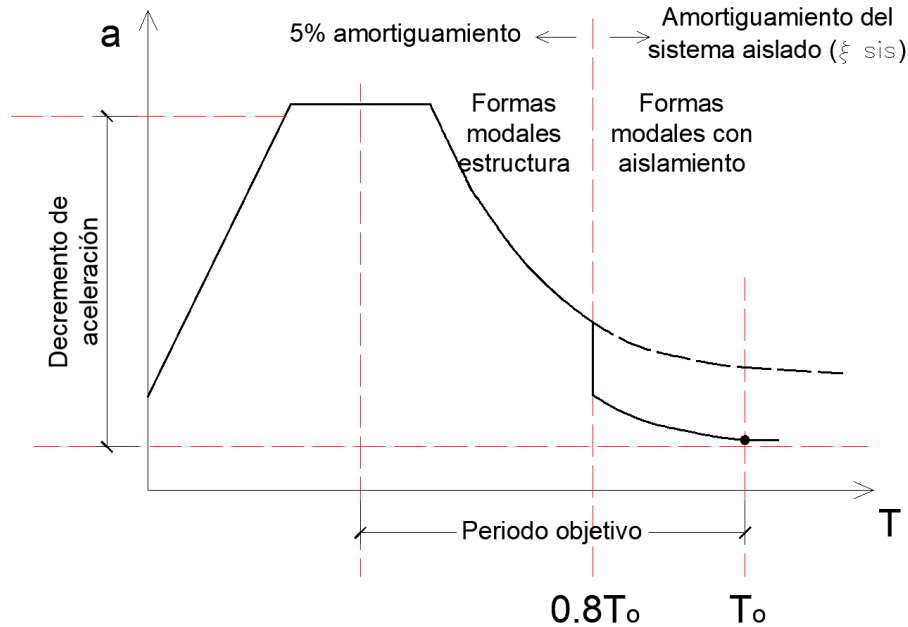


Figura 5.7. Espectro de respuesta modificado para considerar el amortiguamiento equivalente del sistema aislado.

Para el empleo del espectro modificado de la Figura 5.7 se debe realizar otro modelo de la estructura aislada, al cual se elimina el amortiguamiento efectivo del dispositivo y se utiliza el espectro elástico modificado, que se obtendrá con el 5 % de amortiguamiento hasta 0.8 del periodo objetivo o del sistema estructura-aislador (T_o) y para valores mayores a $0.8T_o$, se calcularán con el amortiguamiento estimado del sistema (Figura 5.7). Con dicho espectro se procede a realizar el análisis modal espectral para la revisión del cortante basal y distorsiones. Cabe comentar que los valores del cortante basal deben ser similares entre los que se obtienen con el primer modelo, en el que se considera el amortiguamiento efectivo del dispositivo y el espectro elástico con 5% de amortiguamiento, y el segundo modelo en el que se emplea el espectro modificado.

5.2.6. Revisión del cumplimiento de los objetivos de diseño basado en desempeño

En esta fase del procedimiento es importante revisar previamente, satisfacer el cortante basal mínimo, para ello se considera la aceleración mínima que tenga prevista la Norma o Manual de diseño, de esta manera el cortante basal mínimo (V_o) se obtiene con:

$$V_o = a_{min} w_o \quad (5.65)$$

$a_{min} = \frac{a}{R}$; $R = 1$ factor de sobre-resistencia

w_o = peso total de la estructura por columna o conjunto de columnas del puente.

Para estructuras aisladas, ASCE-16 propone la verificación del cortante basal con la siguiente ecuación:

$$V_b = K_M D_M \quad (5.66)$$

$$K_M = K_{ef}$$

D_M = desplazamiento de diseño (obtenido del primer modelo)

El valor V_b se compara con respecto a V_o , buscando que, $V_b > V_o$, además de que V_b satisfagan los cortantes mínimos actuantes que se obtienen a partir del espectro modificado.

Por otro lado, se tendrá que revisar si el puente con aislamiento sísmico satisface los niveles de desempeño establecidos en la tabla al vigilar que la distorsión demandada en las columnas no supere las permisibles y con ello se busque un mejor control del daño.

5.2.7. Diseño y detallado de los elementos estructurales del puente

Una vez satisfecho el cortante basal mínimo, así como los niveles de desempeño se procede al diseño final de los elementos que conforman la superestructura, así como los correspondientes a la subestructura con la respectiva revisión del detallado del refuerzo de sus secciones (pilas o columnas, traveses primarias, traveses secundarias, etc.).

5.2.8. Planos, especificaciones y recomendaciones

En los planos estructurales del puente se deberá especificar el material de construcción, con sus propiedades básicas de diseño. Así mismo, plasmar las geometrías y detallados de los

elementos que conforman la superestructura y subestructura. En lo que respecta a los aisladores sísmicos es importante hacer referencia al procedimiento de montaje, así como recomendaciones sobre inspección y mantenimiento de estos dispositivos.

Cabe comentar que, dentro del procedimiento de montaje, es esencial describir especificaciones entorno al manejo, traslado y almacenamiento, así como lo relacionado a la preparación del montaje de dispositivos y labores de montaje de los mismos. En cuanto a dichas labores, es importante señalar el proceso de verificación y rectificación de la superficie de grout, posicionamiento del dispositivo y pernos de montaje. Para mayor información al respecto se puede consultar el trabajo CSSO (2015-1).

En cuanto a las recomendaciones sobre inspección y mantenimiento, son medidas a tomar en consideración para mantener en óptimas condiciones los dispositivos. En el caso de la inspección se recomienda que esta se realice cada 5 años o menos, con posibles inspecciones extraordinarias en caso de incendio, evento sísmico e inundaciones. En lo que concierne al mantenimiento, se sugiere estar al pendiente de la reparación de pintura en los aisladores, así como la reparación del grout, de la protección contra humedad excesiva, entre otros aspectos que se comentan ampliamente en CSSO (2015-2).

En la figura 5.8 se muestra un prototipo de plano sobre las especificaciones técnicas de un aislador sísmico.

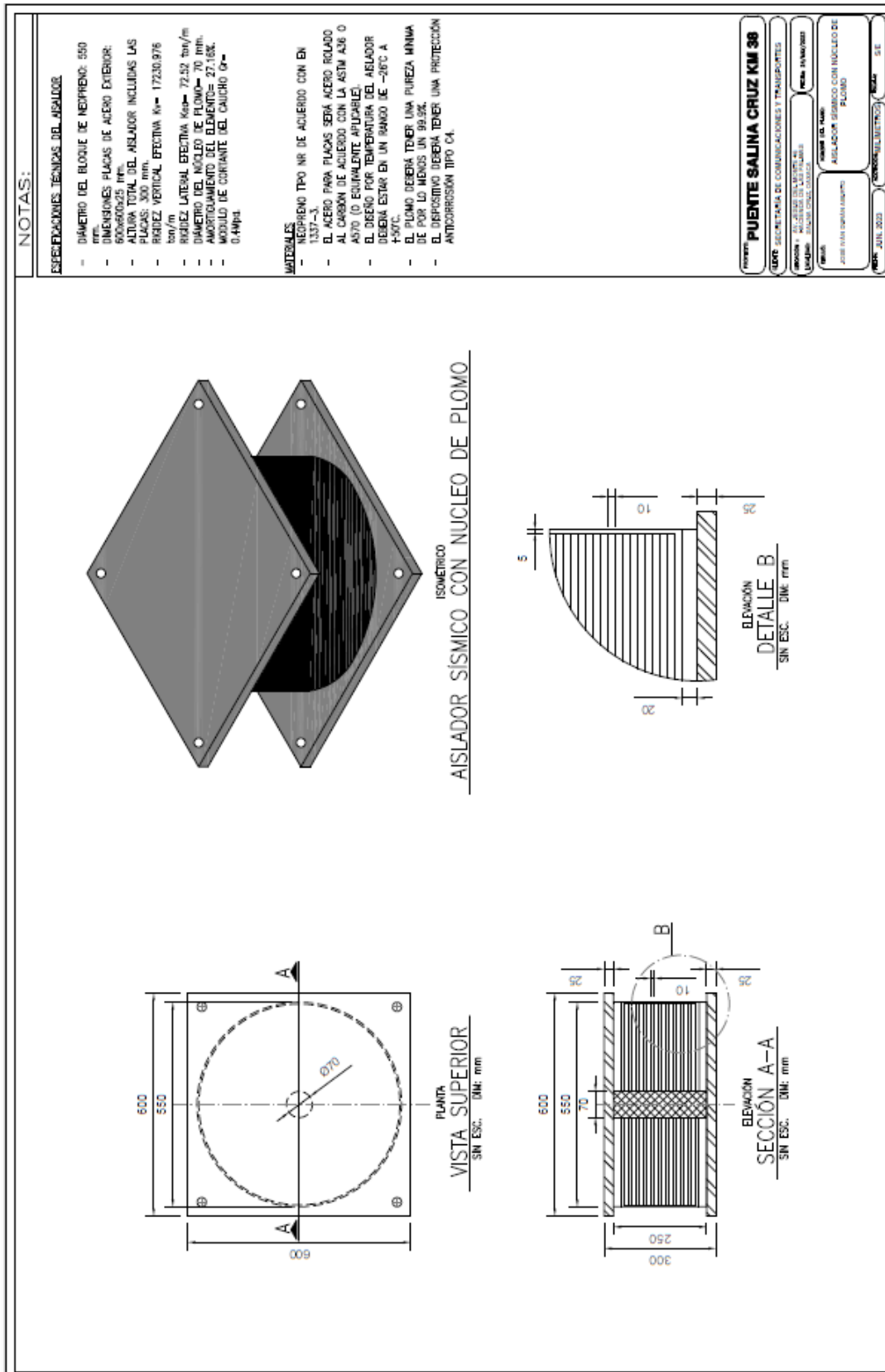


Figura 5.8. Plano sobre las especificaciones técnicas de un aislador de base.

5.3 Ejemplo de aplicación

Con base en el procedimiento de diseño propuesto en el capítulo anterior, a continuación, se desarrollará un ejemplo de la aplicación del mismo, a un puente carretero considerando dos casos, usando un espectro de respuesta y por otro lado, con un espectro de diseño.

5.3.1. Descripción del proyecto

El caso de estudio que se presenta consiste en un puente vehicular que está estructurado por dos estribos y 8 pilas de concreto reforzado las cuales junto con los cabezales del mismo material, forman 4 marcos paralelos, formando un total de 5 claros con longitudes de 30 metros, formados por un sistema de vigas ASSHTO y diafragmas de concreto. El puente posee un área total en planta de 6,463 cm² y un peso propio por metro lineal de 1551 kg/m. En el siguiente esquema se muestra la distribución de las pilas y los claros que se conforman al puente:

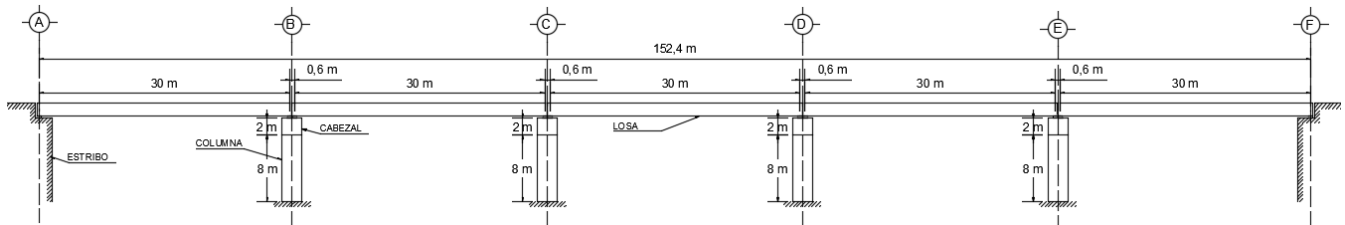


Figura 5.9 Sección longitudinal del puente

Del esquema y estructuración antes mostrada, se generó un modelo en el programa SAP 2000, con el fin de analizar su comportamiento, se consideró con base empotrada en las columnas, de acuerdo con la geometría de dicha estructura.

Para realizar el modelo, se utilizó concreto de resistencia $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y un peso volumétrico de $\gamma = 2400 \text{ kg/cm}^3$. Para el caso de las vigas AASHTO, se consideró el concreto de acuerdo a información de fabricantes, del cual fue de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$.

Por simplicidad del modelo, este se realizó con elementos barra, colocando sobre ellas las cargas correspondientes a la losa, carpeta de rodamiento, banquetas y parapetos. Las cargas añadidas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10 Cargas aplicadas al modelo de cálculo del puente

Geometría	Largo (m)	Ancho (m)	Peso (ton)
Losa	10.7	0.2	5136
Carpeta	10.7	0.05	1177
Banqueta	0.2	0.7	336
Viga parapetos	0.25	0.35	210
Parapetos	0.8	0.2x0.2	154
Peso por metro lineal de tablero			7013
Peso por claro			210

Considerando las cargas anteriores más las cargas propias de las vigas AASHTO, tenemos que el peso total por claro es:

$$Wt = 210 \text{ ton} + 279 \text{ ton} + 3 \text{ ton} = 492.71 \text{ ton}$$

Este dato, es de utilidad para poder realizar el diseño conceptual de los aisladores óptimos de la estructura.

Definición del sismo de estudio

Para poder definir el sismo de estudio, se han considerado dos casos, el primero usando un registro sísmico y el segundo con un espectro de diseño obtenido del PRODISIS.

La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, la cual pone a disposición un amplio catálogo de registros de movimientos sísmicos identificados en toda la república mexicana, desde 1964 hasta el 2017 y que van desde magnitudes de $M=1.9$ hasta $M=8.2$, todos ellos, tomados a través de la red sísmica nacional.

De dicha red, se obtuvieron los registros sísmicos con mayores aceleraciones presentadas a lo largo de la zona del pacífico mexicano, para tres diferentes tipos de sismos los cuales se muestran a continuación:

Tabla 11: Registros sísmicos para análisis sísmico. (Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería, UNAM)

Epicentro	Estación	Magnitud	Profundidad	Fecha
60 km al noroeste de Puerto Ángel, Oaxaca.	Jamiltepec, Pinotepa Nacional.	7.4	16 km	30/09/1999
133 km al suroeste de Pijjiapan, Chiapas.	Salina Cruz, Oaxaca	8.2	45.9 km	08/09/2017
12 km al suroeste de Axochiapan, Chiapas.	Tehuacán, Puebla.	7.1	38.5 km	19/09/2017

Con base en los registros sísmicos mostrados en la tabla anterior y con ayuda del programa DEGTRA, se generaron los espectros de desplazamiento y aceleración absoluta, para realizar el respectivo análisis sísmico. Los espectros de desplazamiento y pseudoaceleración, resultado del programa, se encuentran en el Anexo 1.

De acuerdo con los espectros generados a partir de los registros de la tabla 11, se consideró usar para el análisis sísmico el registro que, en su espectro de pseudoaceleración, mostrará un valor mayor de esta en un periodo menor a 1 segundo. Como resultado de esto, el registro de la estación Salina Cruz, posee una aceleración absoluta máxima de 657.79 cm/s², para un periodo de 0.262 segundos, este periodo será llamado T_{max}. Será este registro el que será introducido al modelo de la estructura para el debido análisis dinámico paso a paso.

Tabla 12: Datos de generación del espectro de pseudoaceleración.

Tiempo	Aceleración Absoluta (cm/seg)
0.01	248.3109
0.060404	424.9913
0.110808	574.8484
0.161212	553.3345
0.211616	444.9241
0.26202	657.7947
0.312424	579.6229
0.362828	353.3942
0.413232	274.3885
0.463636	240.7672
0.51404	242.8719
0.564444	347.3692
0.614849	291.7502
0.665253	306.188
0.715657	272.3779
0.766061	295.5325
0.816465	289.9416
0.866869	259.8368
0.917273	286.4127
0.967677	299.2385
1.01808	232.9908

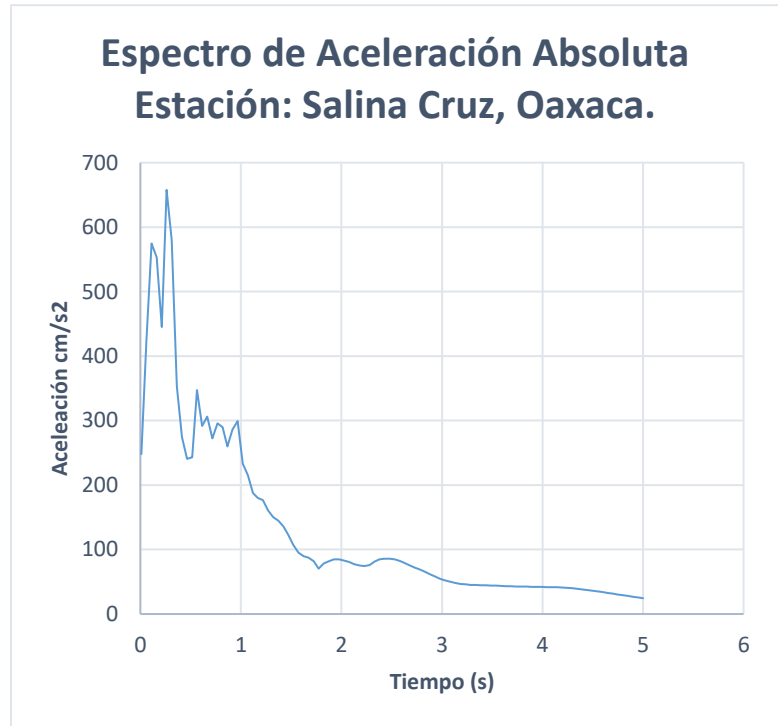


Figura 5.10: Espectro de aceleración absoluta para el registro de la estación Salina Cruz.

Con base en la ubicación de la estación seleccionada, se ha considerado un segundo caso para el sismo de diseño del aislamiento sísmico, el cual consiste en obtener un espectro de diseño del programa PRODISIS desarrollado por CFE.

Para dicho espectro, se consideraron las mismas coordenadas que la estación Salina Cruz, para un terreno tipo II y una estructura de importancia A2. El espectro transparente con $Q=1$ y $R=1$ se muestra en la figura 5.11.

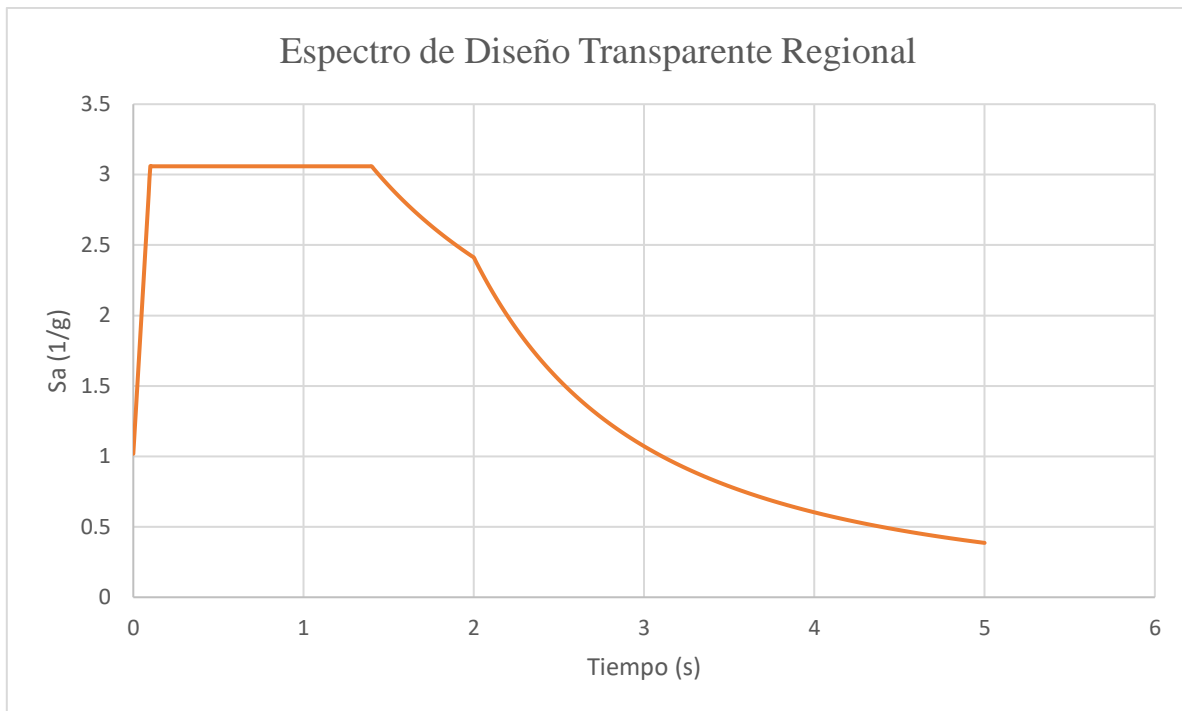


Figura 5.11: Espectro de diseño transparente para Salina Cruz, Oaxaca.

Para el ejemplo de aplicación será utilizado un espectro de diseño modificado, obtenido a partir del espectro de diseño transparente mostrado anteriormente. El espectro de diseño modificado se muestra en el Anexo 3.

Modelo de la estructura sin aislamiento sísmico

Se realizaron modelos tridimensionales en el programa Structural Analysis Program (SAP 2000), en el cual se consideraron las características geométricas del puente definido anteriormente, para un modelado con base empotrada y un análisis elástico de la estructura. El modelo se realizó con elementos barra, las cargas de la tabla 10 fueron aplicadas directamente sobre las vigas AASTHO como cargas repartidas y está compuesto por los siguientes elementos:

- Columnas: con una sección circular y diámetro de 2.4 m, estas poseen una longitud de 8.0 m y se encuentran empotradas en la parte inferior; en la parte posterior, están conectadas por un nodo con el cabezal, que sostiene a las vigas tipo AASTHO. El puente posee 8 columnas de este tipo en su parte central, formando cuatro marcos y en los extremos el puente se modela empotrado simulando estribos que sostienen al cabezal.

- Cabezal: cuenta con una sección cuadrada de 1.5 m de base por 1.5 metros de altura, con una longitud de 9 metros y este se encuentra apoyado sobre las columnas formando un marco. Este elemento es el encargado de transmitir la carga que reciben las vigas, directamente hacia las columnas y estas a su vez a la cimentación. los cabezales que se encuentran en la
- Vigas: los 5 claros que componen el puente están conformados por 6 vigas AASHTO tipo V, de 30 metros de longitud, estos elementos son los encargados de recibir las cargas procedentes de la losa, carpeta de rodamiento, y demás elementos que conforman el puente, por otro lado, recibirán la carga correspondiente a los vehículos de diseño.

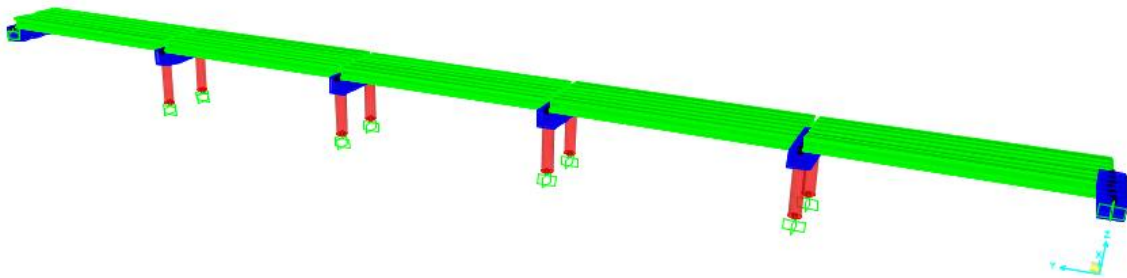
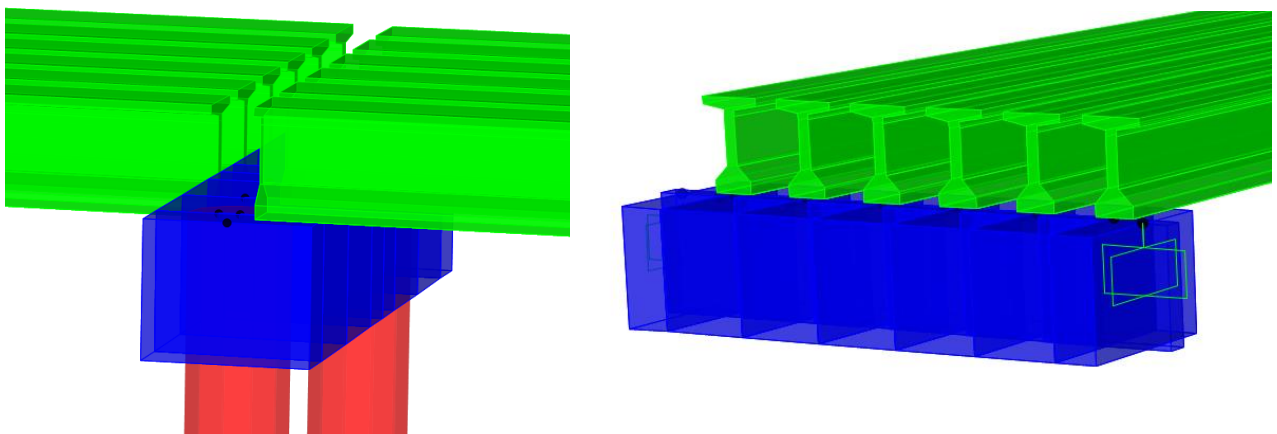


Figura 5.12. Esquema general del modelo estructural sin aislamiento.

A continuación, se muestra el esquema general del modelo:



(a) Conexión columna – viga

(b) Conexión en estribo – viga.

Figura 5.13. Conexión de elementos estructurales.

Para este primer modelo, se ha considerado introducir en el programa el espectro de diseño modificado, el cual se muestra en el Anexo 3. Con dicho modelo se obtendrán los periodos de la estructura sin aislamiento sísmico y los elementos mecánicos para poder realizar más adelante una comparativa entre el modelo con aislamiento y el modelo sin aislamiento.

Del modelo mostrado anteriormente, se realizó un análisis modal de donde se obtuvieron los periodos de vibración que presenta la estructura para cada uno de los 12 modos de vibrar y se muestran en la siguiente tabla:

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (cyc/s)
1	0.565	1.769
2	0.558	1.792
3	0.548	1.824
4	0.540	1.853
5	0.537	1.863
6	0.537	1.864
7	0.536	1.864
8	0.536	1.865
9	0.536	1.865
10	0.536	1.865
11	0.536	1.865
12	0.536	1.865

Tabla 13: Periodos de vibración para primeros 12 modos en puente sin aislamiento.

Como se puede observar en la tabla anterior, el periodo dominante en el modo de vibrar 1, $T_A=0.565$, presentándose una deformación en el sentido mostrado en la imagen:

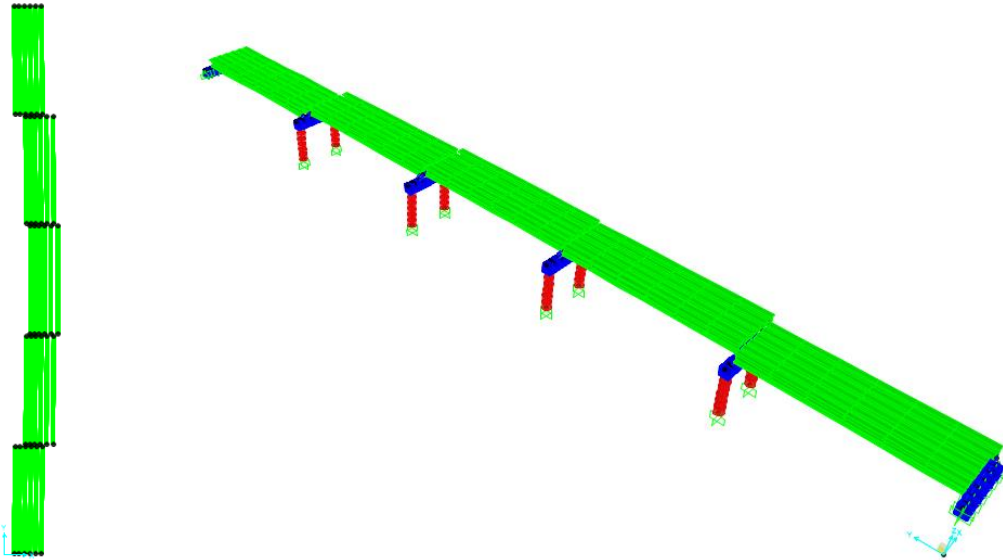


Figura 5.14: Primera forma modal $T_A = 0.565s$

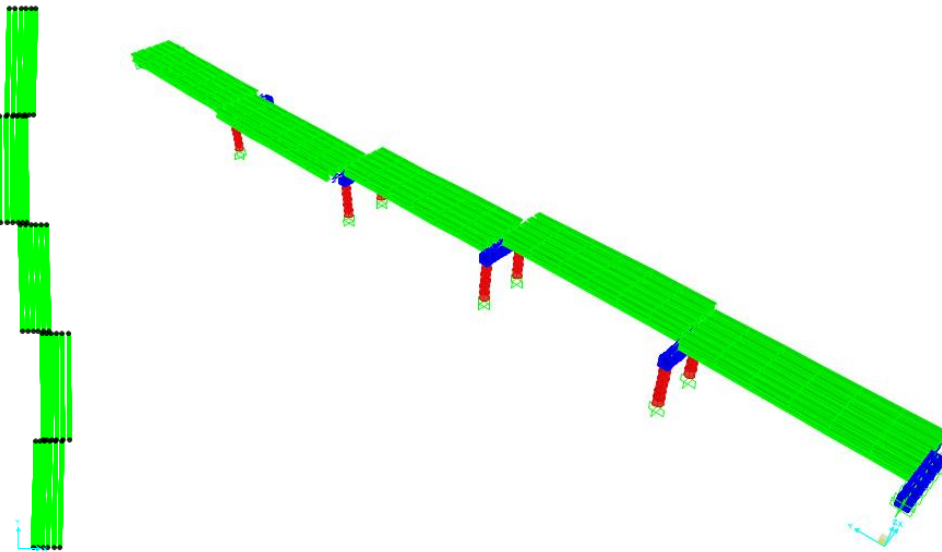


Figura 5.15: Segunda forma modal $T_A = 0.558s$

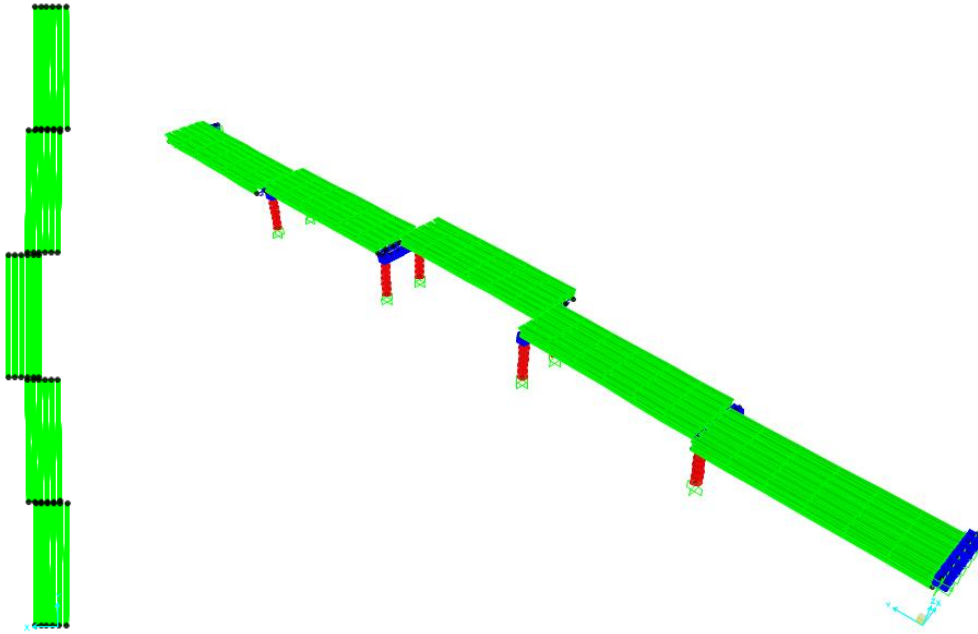


Figura 5.16: Tercera forma modal TA= 0.548s

Elementos mecánicos del modelo sin aislamiento.

Como resultado del modelo estructural, se obtuvieron los elementos mecánicos para cada uno de los elementos estructurales, considerando para ello, los más desfavorables dentro de las combinaciones de carga. En la siguiente tabla, se muestran los valores obtenidos a del programa SAP 2000:

Elemento	Momento Máximo (ton-m)	Cortante Máximo (ton)
Columnas	981.385	274.845
Cabezales	Máximo Negativo: -1101.55 Máximo Positivo: 729.114	490.507
Vigas AASTHO tipo V	410.07	54.67

Tabla 14: Elementos mecánicos más desfavorables en modelo sin aislamiento

5.3.2 Aplicación del procedimiento de diseño

Para poder diseñar el aislamiento sísmico, se deben establecer diversas características y propiedades de la estructura y los aisladores. Dentro de estas se encuentran el número de aisladores, la carga axial máxima que recibirá el aislador y el periodo objetivo dentro del cual

la estructura recibirá una menor aceleración al momento de un movimiento sísmico. Para poder establecer el periodo objetivo, se deberá analizar el espectro de aceleraciones utilizado y verificar hasta qué punto la estructura recibirá una menor aceleración, dentro de un rango de periodo de tiempo. Se considera colocar un aislador, debajo de cada uno de los apoyos de las vigas soportadas por el cabezal, al ser 6 vigas, se considera colocar 12 aisladores por claro de puente.

El diseño del puente con base aislada se realizará con aisladores tipo LRB, diseñado con bloques elastoméricos reforzados con acero adherido mediante vulcanización y núcleo de plomo central. Algunas de las propiedades necesarias para el diseño de los aisladores se tomarán de catálogos proporcionados por los diferentes fabricantes, mientras que algunas otras serán propuestas para la realización del procedimiento de diseño, mismas que serán revisadas y corregidas durante el proceso.

Se enumerarán cada uno de los pasos a seguir, formando un proceso iterativo para el cual se proponen los siguientes valores:

- Factor de incremento propuesto para el periodo objetivo $\eta_{obj} = 2.8$
- Porcentaje de amortiguamiento del aislamiento $\xi_a = 27\%$
- Porcentaje de amortiguamiento del sistema $\xi_{sis} = 26\%$

Al termino de los pasos, se obtendrán 3 nuevos valores de η_{obj} , ξ_a y ξ_{sis} que serán sustituidos al inicio del nuevo proceso en el primer paso. Las iteraciones continuarán con los hasta que los 3 valores y las demás propiedades del aislador no cambien.

De acuerdo con el modelo realizado sin aislamiento sísmico, se obtienen los siguientes datos:

- Peso total de la superestructura: $w_{tot} = 2463.55 \text{ ton}$
- Peso por claro: $w_s = 492.71 \text{ ton}$
- Número de aisladores por claro. $Na = 12$
- Periodo de la estructura con base fija $T_F = 0.565 \text{ s}$

Se realizará un primer diseño considerando el espectro de diseño para Salina Cruz, obtenido del PRODISIS y en segundo lugar, el diseño será verificado utilizando el Espectro de aceleración absoluta para el registro de la estación Salina Cruz.

1. Periodo de vibración objetivo

$$T_o = \eta_{obj} T_F = 2.8 \times 0.565 = 1.58 \text{ s}$$

La frecuencia circular del sistema aislado es:

$$w_o = \frac{2\pi}{T_o} = \frac{2\pi}{1.58\text{s}} = 3.97 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

2. Periodo del sistema de aislamiento requerido

$$T_{sa} = T_a^2 + T_F^2 = T_o$$

Obteniendo el periodo del aislador como:

$$T_a = \sqrt{T_{sa}^2 - T_F^2} = \sqrt{(1.58)^2 - (0.565)^2} = 1.48 \text{ s}$$

$$w_a = \frac{2\pi}{T_a} = \frac{2\pi}{1.48 \text{ s}} = 4.2489 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

3. Rigidez efectiva total (K_{et})

$$M_s = \frac{w_s}{g} = \frac{492,710 \text{ kg}}{g} = 50,225.3 \frac{\text{kg}}{\text{m/s}^2}$$

$$K_{et} = M_s w_a^2 = 50,225.3 \frac{\text{kg}}{\text{m/s}^2} (4.2489 \text{ rad/s})^2 = 906,714.041 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

4. Rigidez de un aislador (K_{ea})

Dividiendo la rigidez total entre el número de aisladores que se tienen por claro, se tiene que:

$$K_{ea} = \frac{K_{et}}{n_a} = \frac{906,714.041 \frac{\text{kg}}{\text{m}}}{12} = 75559.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

5. Desplazamiento de la estructura con el periodo objetivo

Para cumplir con el periodo objetivo de 1.57 s y de acuerdo con el espectro de desplazamiento para un amortiguamiento igual al propuesto para el sistema de 26%, se requiere de un desplazamiento total (D_T) de 13.4227 cm como se muestra en la figura 5.17:

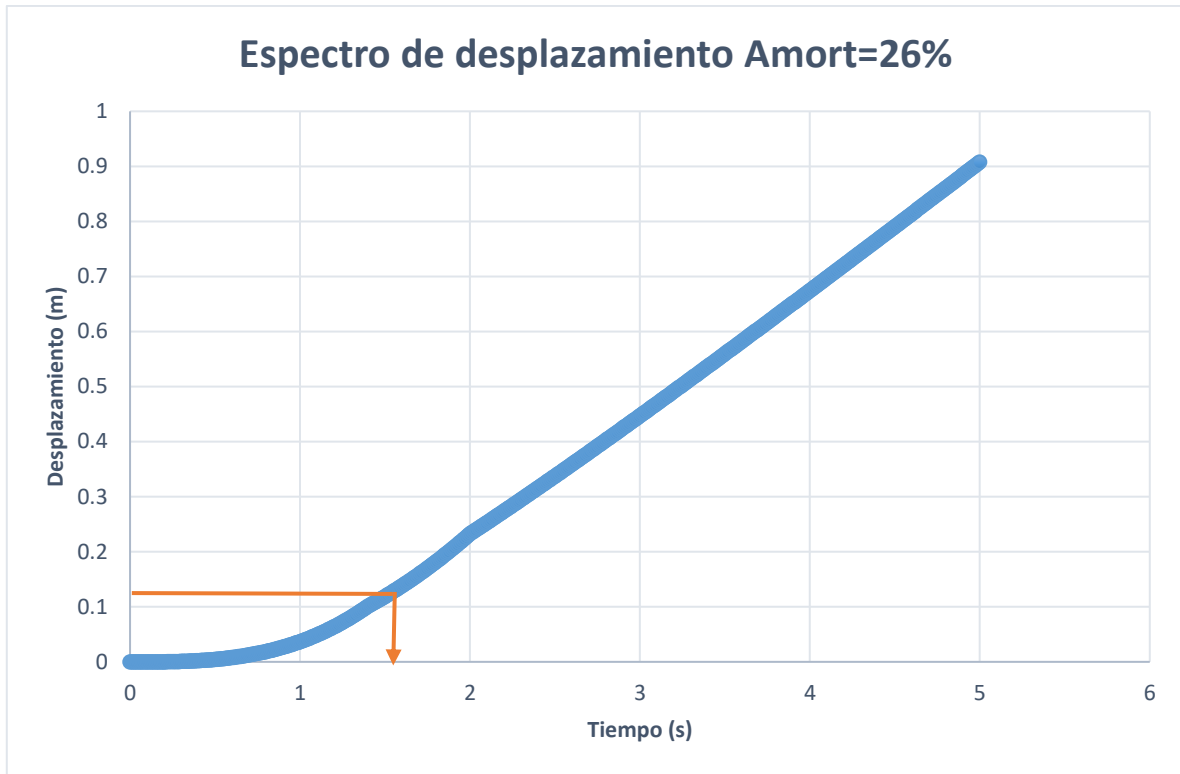


Figura 5.17: Espectro de desplazamiento con amortiguamiento del 26%

6. Desplazamiento del aislador

El desplazamiento del aislador es:

$$D_a = D_T \left(\frac{T_a^2}{T_{sa}^2} \right) = 0.134227 \text{ m} \left(\frac{1.48 \text{ s}^2}{1.58 \text{ s}^2} \right) = 0.117106 \text{ m}$$

7. Energía disipada en un ciclo de histéresis

$$\begin{aligned} E_D &= 2 \cdot \pi \cdot K_{ea} \cdot D_a^2 \cdot \xi_a = 2 \times \pi \times 75559.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times (0.117106 \text{ m})^2 \times 0.27 \\ &= 1757.74 \text{ kg} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

8. Desplazamiento de fluencia (D_y) y rigidez de postfluencia (K_2)

Para el cálculo de (D_y) se realiza un proceso iterativo donde se supone que $D_y = 0$ para la primera iteración, sustituyendo el valor final obtenido en la siguiente iteración para así repetir el proceso hasta que los valores sean iguales, por lo que:

Para cuando $D_y = 0$

$$Q_o = \frac{E_D}{4(D_a - D_y)} = \frac{1757.74 \text{ kg.m}}{4(0.117106\text{m} - 0)} = 3752.44 \text{ kg}$$

La rigidez postfluencia se obtiene con la siguiente expresión:

$$K_2 = K_{ea} - \frac{Q_o}{D_a} = 75559.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}} - \frac{3752.44 \text{ kg}}{0.117106 \text{ m}} = 43516.57 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Por lo que recalculando D_y , se tiene que:

$$D_y = \frac{3752.44 \text{ kg}}{9 \times 43516.57 \frac{\text{kg}}{\text{m}}} = 0.009581 \text{ m}$$

Con el nuevo valor de D_y , se realiza de nuevo el cálculo de este paso, considerando ahora que $D_y = 0.009581 \text{ m}$ y que $K_1 = 10K_2$.

De este modo se seguirá calculando en un proceso iterativo, siempre sustituyendo el nuevo valor hasta que los resultados sean iguales. Los resultados de dicha iteración para este caso, se muestran en la siguiente tabla:

Iteración	D_y	Q_o	K_2	K_1	D_y
1	0.009581	4086.798133	40661.36357	406613.6357	0.011167571
2	0.011167571	4147.998781	40138.7567	401387.567	0.011482387
3	0.011482387	4160.362024	40033.18404	400331.8404	0.011546982
4	0.011546982	4162.90785	40011.44462	400114.4462	0.011560325
5	0.011560325	4163.434141	40006.9505	400069.505	0.011563086
6	0.011563086	4163.543027	40006.0207	400060.207	0.011563657
7	0.011563657	4163.565558	40005.82829	400058.2829	0.011563775
8	0.011563775	4163.570221	40005.78848	400057.8848	0.011563799
9	0.011563799	4163.571186	40005.78024	400057.8024	0.011563804
10	0.011563804	4163.571386	40005.77854	400057.7854	0.011563806
11	0.011563806	4163.571427	40005.77818	400057.7818	0.011563806

Tabla 15: Resultados del proceso iterativo para el cálculo de D_y

Los valores finales y que serán utilizados para continuar con el cálculo corresponden a la iteración 11.

9. Fuerza de fluencia

Con los datos arrojados de la última iteración, se calcula la fuerza de fluencia:

$$F_y = Q_o + K_2 D_y = 4163.5714 \text{ kg} + \left(40005.7782 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0.0115638 \text{ m} \right) = 4626.19 \text{ kg}$$

10. Diámetro del núcleo de plomo

El área del plomo se obtiene con la siguiente expresión:

Considerando $\tau_p = 1050000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

$$A_p = \frac{Q_o}{\tau_p} = \frac{4163.5714 \text{ kg}}{1050000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} = 0.003965306 \text{ m}^2$$

El diámetro del plomo es:

$$\phi_p = \sqrt{\frac{4 A_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.003965306 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.071054717 \text{ m} = 7.11 \text{ cm}$$

En este paso, se proponen las dimensiones preliminares del aislador las que servirán como base para definir durante el proceso iterativo las dimensiones definitivas. Es importante mencionar que dichas dimensiones se pueden cambiar en caso de ser necesario. Por lo tanto el diámetro real del plomo se considera:

$$\phi_{pReal} = 7.00 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$$

Por lo cual el área real es:

$$A_{pReal} = \frac{\pi \phi_{pReal}^2}{4} = 0.00384846 \text{ m}^2$$

11. Área del caucho

Tomando en cuenta que:

$$D_{max} = 1.5 D_a = 1.5 \times 0.117106 \text{ m} = 0.1757 \text{ m}$$

el diámetro total del aislador es igual a:

$$\phi_T = 3 D_{max} = 3 \times 0.1757 \text{ m} = 0.5270 \text{ m} = 52.70 \text{ cm}$$

Se propone un diámetro del caucho de 55 cm quedando el diámetro y área total:

$$\phi_{Treal} = 0.55 \text{ m}$$

$$A_T = \frac{\pi \phi_{Treal}^2}{4} = 0.2375835 \text{ m}^2$$

De esta manera el área real del caucho es:

$$A_r = A_T - A_p = 0.2337 \text{ m}^2$$

12. Cálculo del espesor del caucho

Con los datos anteriores y considerando el módulo de cortante del caucho como $G_r = 40789 \frac{kg}{m^2}$, se calcula el espesor del caucho con la siguiente expresión:

$$h_r = \frac{G_r A_r}{K_2} = \frac{40789 \frac{kg}{m^2} \times 0.2337 \text{ m}^2}{40005.7782 \frac{kg}{m}} = 0.238 \text{ m}$$

Se propone un espesor del caucho de 25 cm para la segunda iteración, por lo que:

$$h_{rReal} = 0.25 \text{ m}$$

13. Cálculo de las propiedades del aislador con las dimensiones propuestas

Con las dimensiones obtenidas anteriormente se deben recalculan de forma inversa para obtener los valores reales del amortiguamiento del aislador y del sistema, con lo cual se tiene:

$$K_1 = \frac{10 G_r A_r}{h_{real}} = \frac{10 \times 40789 \frac{kg}{m^2} \times 0.2337 \text{ m}^2}{0.25 \text{ m}} = 381352.74 \frac{kg}{m}$$

$$K_2 = \frac{K_1}{10} = 0.1 K_1 = 0.1 \times 381352.74 \frac{kg}{m} = 38135.27 \frac{kg}{m}$$

$$Q_o = A_p \tau_p = 0.00384846 \text{ m}^2 \times 1050000 \frac{kg}{m^2} = 4040.88 \text{ kg}$$

$$D_y = \frac{Q_o}{9 K_2} = \frac{4040.88 \text{ kg}}{9 \times 38135.27 \frac{kg}{m}} = 0.011774 \text{ m}$$

$$F_y = Q_o + K_2 D_y = 4040.88 \text{ kg} + \left(38135.27 \frac{kg}{m} \times 0.011774 \text{ m} \right) = 4489.87 \text{ kg}$$

$$K_{ea} = K_2 + \frac{Q_o}{D_a} = 38135.27 \frac{kg}{m} + \frac{4040.88 \text{ kg}}{0.117106 \text{ m}} = 72641.33 \frac{kg}{m}$$

$$K_{et} = \eta_a K_{ea} = 12 \times 72641.33 \frac{kg}{m} = 871696.01 \frac{kg}{m}$$

Con los valores recalculados, se obtiene el amortiguamiento del aislador siguiendo las ecuaciones del MDOC-CFE (2015), considerando que el porcentaje de amortiguamiento viscoso

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} = \frac{38135.27 \frac{kg}{m}}{381352.74 \frac{kg}{m}} = 0.1$$

$$\mu = \frac{0.117106 \text{ m}}{0.011774 \text{ m}} = 9.95$$

El amortiguamiento del aislador se define como:

$$\xi_a = \xi_{his} + \xi_v$$

Considerando que por lo que $\xi_v = 0\%$:

$$\xi_{his} = \frac{2(1-\alpha)\left(1-\frac{1}{\mu}\right)}{\pi(1+\alpha(\mu-1))} = \frac{2(1-0.1)\left(1-\frac{1}{9.95}\right)}{\pi(1+0.1(9.95-1))} = 0.27200317$$

$$\xi_a = \xi_{his} + \xi_v = 0.27200317$$

Para el cálculo del amortiguamiento del sistema, es necesario el cálculo de la rigidez de la estructura como cuerpo rígido, la cual se obtiene aplicando una fuerza en la parte superior de la estructura con base rígida. Considerando una carga de 1000 kN y los desplazamientos relativos obtenidos del modelo con base rígida $\Delta = 0.002093345 \text{ m}$, se tiene que:

$$K_{es} = \frac{v}{\Delta} = \frac{1000 \text{ kN}}{0.002093345 \text{ m}} = 48695653.39 \frac{kg}{m}$$

Por lo que el amortiguamiento del sistema es y considerando el amortiguamiento convencional de la estructura $\xi_{es} = 0.05$:

$$\xi_{sis} = \frac{\xi_a + \frac{\xi_{es} K_{et}}{K_{es}}}{1 + \frac{K_{et}}{K_{es}}} = \frac{0.2720 + \frac{0.05 \times 871696.01 \frac{kg}{m}}{48695653.39 \frac{kg}{m}}}{1 + \frac{871696.01 \frac{kg}{m}}{48695653.39 \frac{kg}{m}}} = 0.268099$$

Se recalcula la energía disipada para un ciclo de histéresis con las nuevas propiedades y la ecuación 5.42:

$$E_D = 4 Q_o (D_a - D_y) = 4 \times 4040.88 \text{ kg} \times (0.117106 \text{ m} \times 0.011774 \text{ m}) = 1702.552 \text{ kg.m}$$

Dicho valor se verifica con la expresión 5.43:

$$E_D = 2 \pi K_{ea} D_a^2 \xi_a = 2 \pi \times 72641.33 \frac{kg}{m} \times (0.117106m)^2 \times 0.272 = 1702.552 \text{ kg.m}$$

La frecuencia del sistema de aislamiento de la ecuación 5.44:

$$w_a = \sqrt{\frac{K_{et}}{M_s}} = \sqrt{\frac{871696.01 \frac{kg}{m}}{50,225.3 \frac{kg}{m/s^2}}} = 4.166 \frac{rad}{s}$$

Y el periodo del aislador es:

$$T_a = \frac{2\pi}{w_a} = \frac{2\pi}{4.166 \frac{rad}{s}} = 1.508 \text{ s}$$

El periodo del sistema estructura – aislador se calcula con la expresión 5.46:

$$T_{sa} = \sqrt{T_a^2 + T_F^2} = \sqrt{(1.508 \text{ s})^2 + (0.565 \text{ s})^2} = 1.6107 \text{ s}$$

Utilizando el nuevo periodo del sistema, se recalcula el factor de incremento para obtener nuevamente el periodo objetivo η_{obj} . Con dicho valor y los resultados obtenidos del amortiguamiento del sistema y del aislador, se inicia la siguiente iteración hasta que los valores coincidan.

Los valores finales de esta primera iteración son los siguientes:

$$\eta_{obj} = 5.8349$$

$$\xi_{sis} = 0.26809 = 26.81\%$$

$$\xi_a = 0.272003 = 27.20\%$$

$$K_{ea} = 73398.778 \frac{kg}{m}$$

Es recomendable la utilización de herramientas de cálculo que permitan la automatización del procedimiento para facilitar las iteraciones necesarias.

Por otro lado, es importante mencionar que al proponer las dimensiones para el aislador, estas deberán mantenerse durante el proceso iterativo.

En las siguientes tablas, se muestran los resultados después de 10 iteraciones para las dimensiones propuestas del aislador:

Tabla 16: Resultados del proceso iterativo con dimensiones propuestas del aislador.

Iteración	η_{obj}	K_{ea}	ξ_{sis}	ξ_a	T_{sa}	T_a
1	2.800000	75559.503453	0.260000	0.270000	1.583204	1.478791
2	2.848645	72641.333841	0.268099	0.272003	1.610709	1.509970
3	2.851573	72471.352700	0.267562	0.271447	1.612365	1.509235
4	2.850355	72541.963280	0.267786	0.271679	1.611676	1.509540
5	2.850861	72512.591293	0.267693	0.271583	1.611963	1.509413
6	2.850651	72524.802253	0.267731	0.271623	1.611844	1.509466
7	2.850738	72519.724530	0.267715	0.271606	1.611893	1.509444
8	2.850702	72521.835808	0.267722	0.271613	1.611872	1.509453
9	2.850717	72520.957919	0.267719	0.271610	1.611881	1.509449
10	2.850717	72521.322947	0.267719	0.271610	1.611877	1.509451

Tabla 17: Continuación tabla de resultados del proceso iterativo con dimensiones propuestas del aislador.

Iteración	D_T	D_a	D_y	E_D	K_1	K_2
1	0.134227	0.117106	0.011564	1702.552334	381352.7418	38135.2741
2	0.133913	0.117686	0.011829	1711.922931	381352.7418	38135.2741
3	0.134044	0.117445	0.011747	1708.019120	381352.7418	38135.2741
4	0.133989	0.117545	0.011781	1709.641046	381352.7418	38135.2741
5	0.134012	0.117503	0.011767	1708.966418	381352.7418	38135.2741
6	0.134003	0.117521	0.011773	1709.246893	381352.7418	38135.2741
7	0.134006	0.117513	0.011770	1709.130263	381352.7418	38135.2741
8	0.134005	0.117516	0.011771	1709.178757	381352.7418	38135.2741
9	0.134006	0.117515	0.011771	1709.158593	381352.7418	38135.2741
10	0.134005	0.117516	0.011771	1709.166977	381352.7418	38135.2741

5.3.3 Diseño final

Una vez terminado el proceso iterativo, el diseño final del aislador así como sus propiedades, se pueden observar en la tabla 18.

Tabla 18: Propiedades y datos del aislador diseñado con el espectro de diseño (PRODISIS).

$\eta_{obj} = 2.8507$	$E_D = 1709.17 \text{ kg.m}$
$\xi_{sis} = 26.77 \%$	$Q_o = 4040.88 \text{ kg}$
$\xi_a = 27.16 \%$	$K_1 = 381352.74 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
$T_{sa} = 1.61 \text{ s}$	$K_2 = 38135.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
$T_a = 1.51 \text{ s}$	$D_y = 0.011771 \text{ m}$
$K_{ea} = 72521.32 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$	$F_y = 4489.87 \text{ kg}$
$K_{et} = 870255.875 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$	$\phi_{Total} = 0.55 \text{ m}$
$D_a = 0.117516 \text{ m}$	$\phi_p = 0.07 \text{ m}$
$D_{m\acute{a}x} = 1.5 \times 0.117516 \text{ m} = 0.1762 \text{ m}$	$h_r = 0.25 \text{ m}$

Análisis estructural

Rigidez vertical (k_v) de acuerdo con Naeim y Kelly (1999):

$$k_v = \frac{E_c A_{tr}}{h_r}$$

considerando un número de capas $n_c = 25$ y los datos de la tabla 18:

$$t_{ri} = \frac{h_r}{n_c} = \frac{0.25 \text{ m}}{25} = 0.01 \text{ m}$$

$$S_i = \frac{\phi_T}{4t_{ri}} = \frac{0.55 \text{ m}}{4(0.01 \text{ m})} = 13.75$$

$$\lambda = \frac{b^2 + a_p^2 - \left[\frac{(b^2 - a_p^2)}{\ln\left(\frac{b}{a_p}\right)} \right]}{(b - a_p)^2} = 0.70761158$$

tomando los valores de a_p y b como:

$$a_p = \frac{\phi_p}{2} = \frac{0.08}{2} = 0.035 \text{ m}$$

$$b = \frac{\phi_T}{2} = \frac{0.55}{2} = 0.275 \text{ m}$$

Por lo tanto, el módulo de compresión caucho-acero es:

$$E_c = 6 \lambda G_r S_i^2 = 6 \times 0.70761158 \times 40789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times (13.75)^2 = 32741203.277 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

De acuerdo con el MOC (CFE-2015), el área de traslape se calcula con:

$$A_{tr} = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen } \delta)$$

donde D_b y δ , considerando el valor de $t_{borde} = 8 \text{ mm}$, se calculan como:

$$D_b = \phi_T - 2 t_{borde} = 0.55 - 2(0.008 \text{ m}) = 0.534 \text{ m}$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{D_{max}}{D_b} \right) = 2 \cos^{-1} \left(\frac{1.5 \times 0.117516 \text{ m}}{0.534 \text{ m}} \right) = 2.468773$$

Por lo que A_{tr} es igual a:

$$A_{tr} = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen } \delta) = \frac{(53.40 \text{ cm})^2}{4} (2.468 - \text{sen}(2.468)) = 1315.695074 \text{ cm}^2$$

Finalmente la rigidez vertical del aislador es:

$$k_v = \frac{E_c A_{tr}}{hr} = \frac{32741203.277 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times 0.1315695 \text{ m}^2}{0.25 \text{ m}} = 17230975.95 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Direcciones horizontales:

Para las direcciones horizontales se deberá tener la rigidez K_{ea} y el amortiguamiento efectivo en el dispositivo el cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$c = 2 \xi_a w_a m_a \quad (5.57)$$

$$w_a = \frac{2\pi}{T_a} \quad (5.58)$$

Considerando la masa actuando sobre un aislador igual a la masa total dividida entre el número de aisladores por claro, tenemos que:

$$m_a = \frac{50225.3 \frac{\text{kg}}{\text{m/s}^2}}{12} = 4185.44 \frac{\text{kg}}{\text{m/s}^2}$$

$$\xi_a = 27.16 \%$$

$$w_a = \frac{2\pi}{T_a} = \frac{2\pi}{1.509451s} = 4.162573 \frac{rad}{s}$$

$$c = 2 \xi_a w_a m_a = 2 \times 0.2716 \times 4.162573 \frac{rad}{s} \times 4185.44 \frac{kg}{m/s^2} = 9464.08 \frac{kg}{m}$$

Se deberá verificar el valor de c con la ecuación 5.64:

$$c = \frac{E_D}{\pi w_a D_a^2} = \frac{1709.17 kg.m}{\pi \times 4.162573 \frac{rad}{s} \times (0.117516 m)^2} = 9464.11 \frac{kg}{m}$$

Dada la cercanía de los valores, se cumple la verificación.

En consecuencia, las propiedades a utilizar en el modelo matemático de análisis se muestran en la tabla 20.

Tabla 19. Propiedades de los aisladores a utilizar en el modelo matemático de análisis.

Propiedades	Parámetros
Lineales	$k_v = 17230975.95 \frac{kg}{m}$
	$K_{ea} = 72521.32 \frac{kg}{m}$
	$c = 9464.08 \frac{kg}{m}$
No lineales (Direcciones horizontales)	$K_1 = 381352.74 \frac{kg}{m}$
	$F_y = 4489.87kg$
	$K_2 = 38135.27 \frac{kg}{m}$

Modelo con aislamiento sísmico.

El modelo aislado, se realizó con las mismas propiedades geométricas que el modelo sin aislamiento, agregando los aisladores como elementos tipo LINK, del tipo Rubber Isolator, cargando las propiedades lineales y no lineales en las direcciones U1, U2 y U3. Estos elementos estarán ubicados en los apoyos inferiores de las vigas y en el extremo superior del cabezal. Los elementos LINK, tendrán las propiedades establecidas en el capítulo anterior,

de acuerdo al diseño realizado, además, fueron utilizados valores proporcionados por fabricantes de aisladores. El proceso de introducción de datos para estos elementos, se muestra en el Anexo 2.

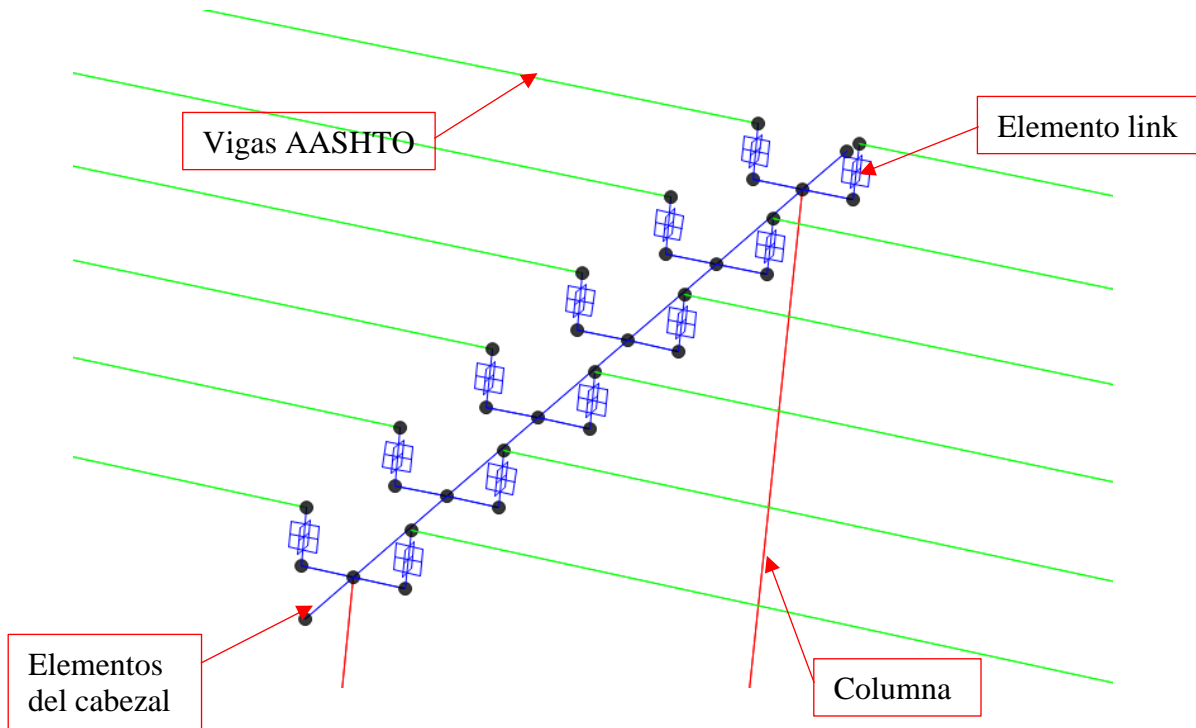


Figura 5.18. Elementos de modelo sísmicamente aislado.

Las propiedades que se colocan en el modelo, son las obtenidas anteriormente con el diseño del aislador. Una vez colocados los aisladores, se verifica que los resultados del modelo como el periodo objetivo y los desplazamientos sean sensiblemente similares a los obtenidos en el diseño del aislador.

Para este análisis sísmico de este modelo, se introduce en el programa el espectro de diseño modificado, el cual se construye con base en la figura 5.7, considerando la reducción por amortiguamiento del sistema aislado, que de acuerdo con el diseño final del aislador es de 26.77%. El espectro de diseño reducido se muestra en el Anexo 3.

Al igual que con el modelo sin aislamiento, fue realizado un análisis del cual se obtuvieron los periodos de vibración que presenta la estructura para los 3 primeros modos de vibrar:

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (cyc/s)
1	1.595703	0.62668316
2	1.593057	0.627723933
3	1.589725	0.62903968

Tabla 20: Periodos de vibración para los 3 primeros modos en puente con aislamiento.

Como se puede observar en los 3 primeros modos de vibrar, el periodo se ha aumentado con la presencia de los aisladores en el sistema. De acuerdo con los establecido en el periodo objetivo de 1.59 s, se puede argumentar que el periodo del modelo satisface al objetivo y se encuentra dentro del rango. El comportamiento del puente en las tres primeras formas de vibrar se muestra en las siguientes imágenes:

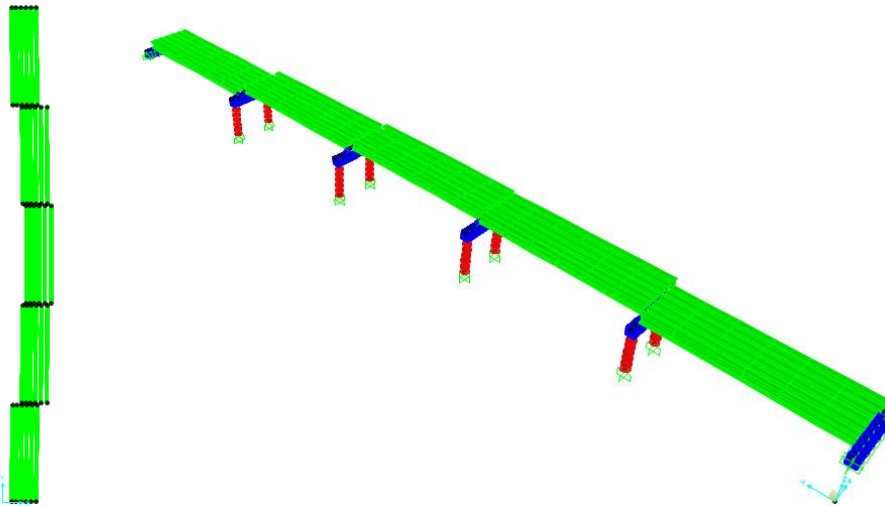


Figura 5.19: Primera forma modal TB= 1. 595s

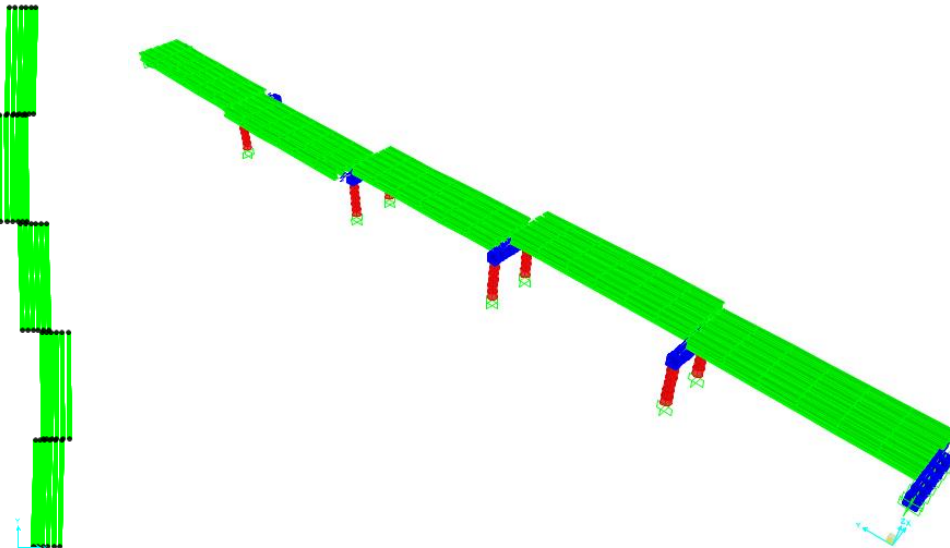


Figura 5.20: Segunda forma modal TA= 1.593 s

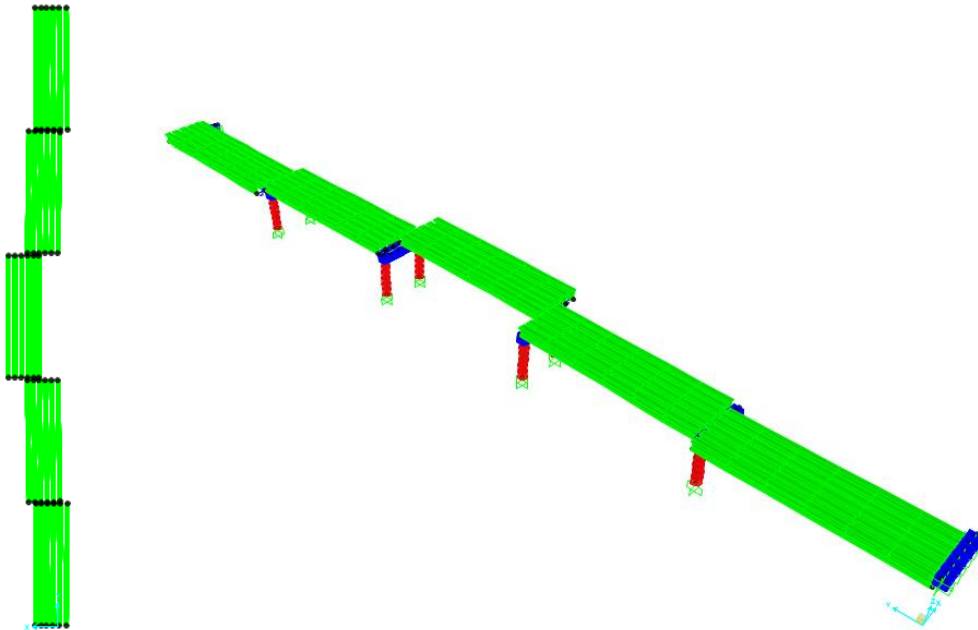


Figura 5.21: Tercera forma modal TA= 1.589 s

Elementos mecánicos para modelo aislado.

Como resultado del modelo estructural sísmicamente aislado, se obtuvieron los elementos mecánicos para cada uno de los elementos estructurales, considerando para ello, los más desfavorables dentro de las combinaciones de carga. En la siguiente tabla, se muestran los valores obtenidos a del programa SAP 2000:

Elemento	Momento Máximo (ton-m)	Cortante Máximo (ton)
Columnas	267.655	77.667
Cabezales	Máximo Negativo: -343.04 Momento Positivo: 290.647	250.108
Vigas AASTHO tipo V	410.07	54.676

Tabla 21 Elementos mecánicos más desfavorables en modelo sin aislamiento

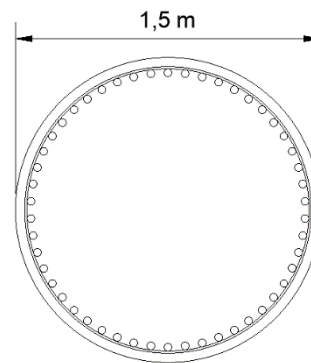
Comparación y diseño de columnas

Se realiza el diseño estructural de las columnas del puente para ambos modelos; el modelo sin aislamiento sísmico y el modelo con el aislamiento sísmico incorporado, de acuerdo con los elementos mecánicos obtenidos y con base en los métodos establecidos por el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México 2017. Para la generación de los diagramas de las columnas, se hace uso del programa DID-2018.

Como es mostrado en las tablas 14 y 21, los momentos presentados en las columnas se han visto disminuidos con la presencia del sistema de aislamiento, esto debido a que el sistema se encarga de disipar parte de los esfuerzos que le son transmitidos a la subestructura. Se ha visto una disminución en el valor del momento máximo en las columnas debido a la presencia del sistema de aislamiento, en comparación con un sistema estructural simple, por lo cual se podría permitir una optimización en el diseño del acero de refuerzo. Los resultados de esta optimización se muestran a continuación:

Revisión de la capacidad de carga en la columna sin aislamiento sísmico

Diametro de columna=	150	cm
Concreto F'_c =	250	kg/cm ²
f_y =	4200	kg/cm ²
β_1 =	0.850	
$\beta_1 * f'_c$ =	212.50	kg/cm ²
Recubrimiento r =	7.5	cm
FR=	0.75	



Armado longitudinal propuesto: **50 varillas #12**

Cuantía=0.032

Elem.	Combinación	P Ton	V2 Ton	V3 Ton	M2 Ton-m	M3 Ton-m
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	28.4588	197.521	2.2076	7.844	795.830
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	58.783	197.521	2.2076	6.511	801.564
C1	1.1CM+1.67CV	363.784	-39.394	0.000769	0.007	-89.038
C1	1.1CM+1.67CV	333.460	-39.394	0.0007685	0.002	167.026
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	228.508	33.376	0.6628	2.354	348.479

C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	258.833	33.376	0.6628	1.958	181.976
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	430.304	-107.320	-0.6613	-1.945	-349.101
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	399.979	-107.320	-0.6613	-2.351	-34.969
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	630.353	-271.465	-2.2062	-6.498	-968.689
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	600.029	-271.465	-2.2062	-7.840	-482.320

Tabla 22 Elementos mecánicos para columna más desfavorables en modelo sin aislamiento

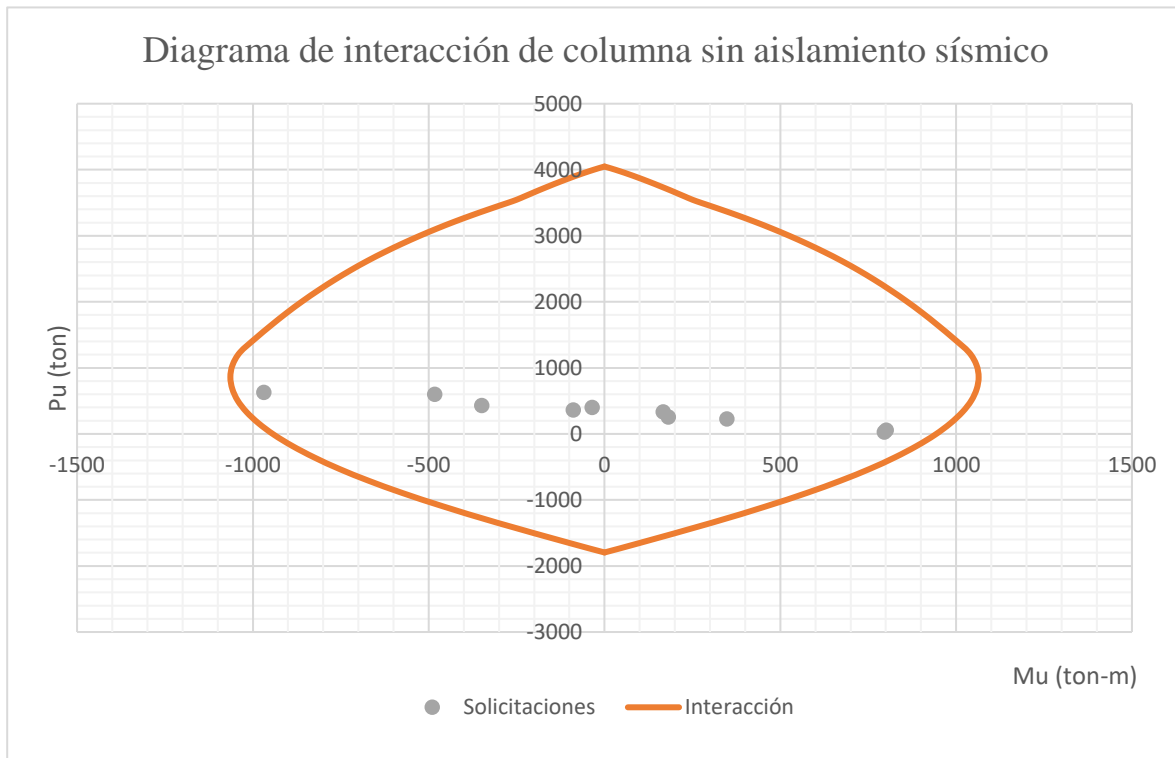


Figura 5.22: Diagrama de interacción de columna sin aislamiento sísmico

Se propone el refuerzo transversal a base de zunchos cuya separación, de acuerdo con las NTC-2017 se realizarán con varillas del #4 con una separación de 5 cm.

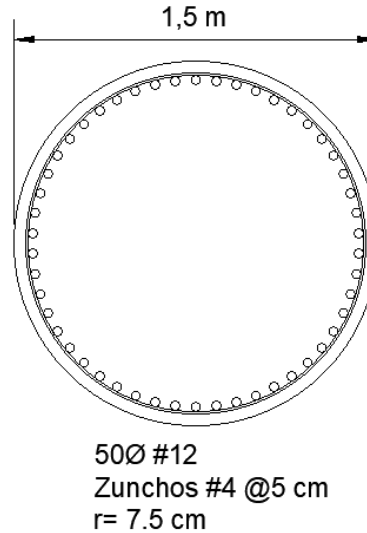
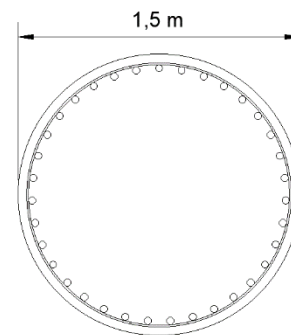


Figura 5.23: Detalle de refuerzo columna sin aislamiento sísmico

Revisión de la capacidad de carga en la columna con aislamiento sísmico

Diámetro de columna=	150	cm
Concreto F'_c =	250	kg/cm ²
f_y =	4200	kg/cm ²
β_1 =	0.850	
$\beta_1 * f'_c$ =	212.50	kg/cm ²
Recubrimiento r=	7.5	cm
FR=	0.75	

Armado longitudinal propuesto: **35 varillas #8 Cuantía: 0.01**

Elem.	Combinación	P Ton	V2 Ton	V3 Ton	M2 Ton-m	M3 Ton-m
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	264.490	3.717	0.0151	0.02817	267.655
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	299.318	-24.766	0.0045	0.00846	190.04189
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	329.170	-49.184	-0.0045	-0.00846	123.49522
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	294.814	3.7168	0.0151	0.06978	70.04157
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	363.998	-77.667	-0.0151	-0.02817	45.88211
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	329.642	-24.7656	0.0045	0.02097	-37.48244
C1	1.1CM+1.67CV	363.784	-39.398	9.053E-10	8.037E-09	-89.04506
C1	1.1CM+1.67CV	333.456	-39.398	9.053E-10	2.153E-09	167.04049
C1	1.1CM+CC+0.3SX+1SY	359.494	-49.184	-0.0045	-0.02097	-129.65625
C1	1.1CM+CC+1SX+0.3SY	394.322	-77.667	-0.0151	-0.06978	-237.18026

Tabla 23 Elementos mecánicos para columna más desfavorables en modelo sin aislamiento

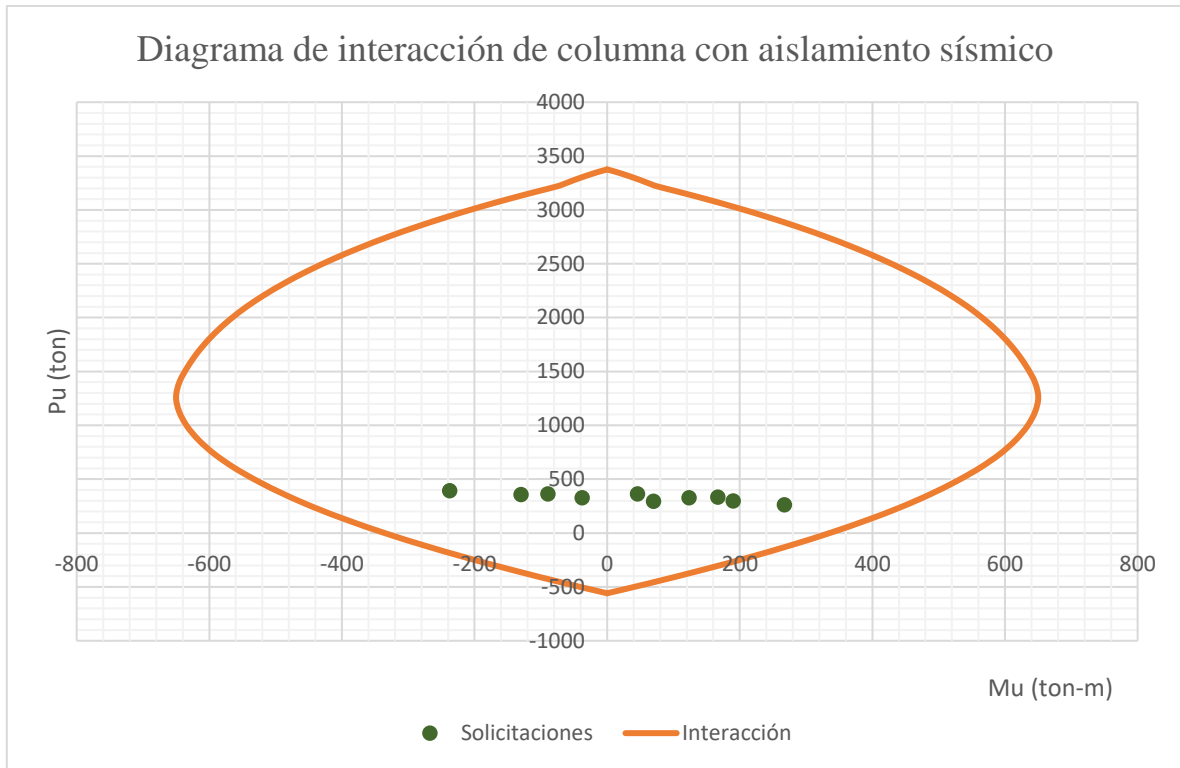


Figura 5.24: Diagrama de interacción de columna con aislamiento sísmico

Se propone el refuerzo transversal a base de zunchos cuya separación, de acuerdo con las NTC-2017 se realizarán con varillas del #4 con una separación de 5 cm.

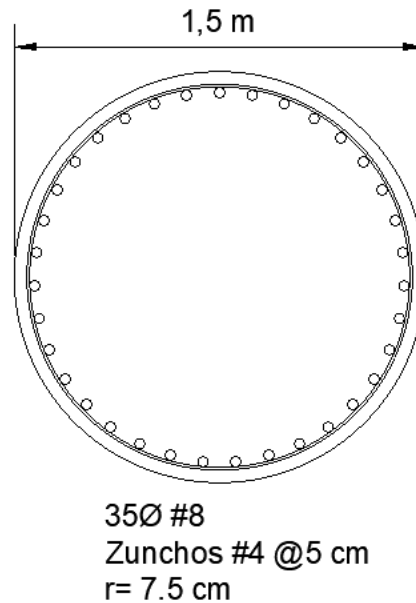


Figura 5.25: Detalle de refuerzo de columna con aislamiento sísmico

5.4. Implicaciones para la práctica de diseño en puentes

Con el procedimiento de diseño propuesto se busca tener una mejor comprensión de los beneficios que tiene el uso del aislamiento sísmico en puentes, así como de conceptos básicos para su implementación, a fin de que a más ingenieros se les facilite la aplicación de la teoría y se sientan con la confianza de emplearlos.

Como se mostró en el procedimiento de diseño, el empleo de este tipo de dispositivos son recomendables en puentes cuya posición con respecto al epicentro de una fuente sísmica es relativamente cercana y cuando el periodo fundamental de la estructura es traslación coincide o es cercano al periodo de la respuesta pico del espectro. De esta manera se puede lograr un mejor desempeño sísmico, al buscar una mejor central de daño y en consecuencia garantizar la funcionalidad de este tipo de obras de infraestructura después de un evento catastrófico como un sismo. De igual forma con este procedimiento de diseño se busca ilustrar los pasos esenciales a seguir en el diseño sísmico de puentes con base aislada, a partir de los conceptos del aislamiento sísmico, buscando con ello simplificar y clarificar su aplicación.

Si bien es cierto, que existe una vasta literatura técnica sobre el tema la mayoría de los ingenieros dedicados al proyecto de puentes no tienen clara la teoría del aislamiento sísmico por lo que tienen sus reservas sobre la aplicación en el diseño sísmico de puentes, ante la incertidumbre sobre la efectividad de estos dispositivos.

CONCLUSIONES

En este proyecto de investigación se propuso un procedimiento de diseño sísmico simplificado para puentes con aisladores de base, con el propósito de mejorar su desempeño estructural en zonas cercanas a los epicentros de subducción en las costas del pacífico mexicano. Las principales conclusiones derivadas al respecto se describen a continuación:

1. En el país se ve limitado el uso del aislamiento sísmico en puentes, en parte por la complejidad de los análisis que suelen emplearse y también por la falta de una norma que brinde la confianza en los proyectos. No obstante, en esta investigación se buscó explicar de manera simples los principales conceptos y dar una orientación sobre el procedimiento a seguir para lograr un buen desempeño sísmico en los puentes ubicados cerca de los epicentros.
2. El procedimiento propuesto en este trabajo tiene un enfoque práctico con el que se pretende ilustrar al ingeniero de la práctica sobre los pasos básicos a seguir iniciando desde las fuentes importantes a considerar para definir si la estructura de un puente es apta para usar aislamiento sísmico en combinación con las características dinámicas del terreno, así como la revisión de los objetivos de diseño de un puente. Así mismo se muestra la forma de determinar las propiedades del aislador conforme a los parámetros que manejan fabricantes de estos dispositivos, para con ello tener mayor claridad de lo que se oferta en el mercado.
3. Como se mostró en el ejemplo de aplicación, la inclusión de aisladores dentro del sistema estructural del puente, disminuyó considerablemente los elementos mecánicos en la subestructura, especialmente en la columna, lo cual conllevó a una optimización y reducción del acero de refuerzo de la sección. Dicha optimización se refiere a los costos totales en el ciclo de vida del puente, dado que disminuyen los

costos por mantenimiento a largo plazo en razón de proteger la estructura de sufrir daños ante posibles sismos severos que pueden ocurrir en un futuro; este es uno de los beneficios que brinda un sistema de aislamiento.

4. A futuro se requieren realizar investigaciones, en donde, con documentos como el Manual de Obras Civiles (CFE ,2015) se puedan incorporar criterios de diseño sísmico de puentes con la inclusión de aislamiento sísmico. Para lograr lo anterior se pueden seguir las recomendaciones que se hacen en el trabajo de Priestley et al. (1996), en el cual se hacen adaptaciones a los puentes para deducir parámetros básicos, tales como: periodo objetivo y amortiguamiento equivalente del sistema.

REFERENCIAS

Alcocer, S.M. et al., (2003), “El sismo de Tecomán del 21 de enero de 2003. Daños en el Estado de Jalisco”, Reporte Interno, Dirección de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Avellana, Álvaro, (2018), Aislamiento sísmico en puentes de México ubicados en la costa del Pacífico, Tesis de maestría, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

Bonilla, Lily, (2012), Teoría del aislamiento sísmico para edificaciones, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

CENAPRED, (2014), Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

CENAPRED, (2017), Vulnerabilidad de Estructuras de Puentes en Zonas de Gran Influencia de ciclones tropicales, Informe de muestreos. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Chopra, A. K., (1995), Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering, Ed. Prentice Hall, Estados Unidos.

Colunga, A. T. (2017). Diseño Sísmico Simplificado De Estructuras Con Muros De Mampostería Aisladas Sísmicamente. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 22(1), 1–33. Recuperado de: https://ia801606.us.archive.org/24/items/Articulo1_201703/Artículo1.pdf

CSSO (2015-1), “EST – Procedimiento de Montaje de Aisladores sísmicos”, Consorcio de Salud Santiago Oriente, Chile.

CSSO (2015-2), “EST – Manual de control, inspección y mantenimiento del sistema de aislación sísmica”, Consorcio de Salud Santiago Oriente, Chile.

Comisión Federal de Electricidad, (2015), Manual de Diseño de Obras Civiles, Capitulo C.1.3: Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas. CFE, México.

Domínguez, José, (2013), Vulnerabilidad sísmica de la superestructura de puentes carreteros, Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

Flores, David, (2017), Inspección de Puentes Carreteros, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Fuentes J. M. (2020), “Aislamiento de Estructuras. Estrategia para incrementar la seguridad estructural y disminuir costos en la construcción.”, Revista Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. 60S, año LXX.

García, Guyelmo, (2017), Análisis comparativo del comportamiento estructural de un edificio de concreto reforzado con y sin aislamiento sísmico en la base, Tesis de maestría, Programa de Maestría y Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Genatios, Carlos & Lafuente Marianela, (2016), Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras, Banco de Desarrollo de América Latina, Caracas, Venezuela.

Gómez, Francisco. (2014), Control de demandas sísmicas en sistemas prefabricados de concreto reforzado con aislamiento sísmico, Tesis de maestría, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez S.I. (2007), “Análisis sísmico moderno. Ética aplicada”, Editorial Trillos.

Hernández, Enrique & Campos Luis, (2008), Daños frecuentes originados por sismo en los puentes de la red federa mexicana, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México.
Hernández, Ulises et al., (2008), Espectros de diseño sísmico para el territorio mexicano, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México.

Hernández, Luis (2005), Efectos de los sismos en puentes. Aspectos básicos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández, Ulises et al., (2008), Espectros de diseño sísmico para el territorio mexicano. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México. Recuperado de:
http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_02/ar_15.pdf

Jaimes, Miguel, (2002), Riesgo sísmico en el Valle de México para varios periodos de retorno debido a sismos de subducción y falla normal, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Jara, Manuel, Álvarez José de Jesús, Jara José M., (2006), Algunas deficiencias de puentes sísmicamente vulnerables, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Kostoglodov, V., Pacheco, J., (1999), Un catálogo de sismos moderados y grandes ocurridos en México durante el siglo XX, Poster “100 años de sismicidad en México”, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Lara, Osvaldo, (2013), Recomendaciones de diseño estructural para evitar daños a los topes sísmicos de puentes, Tesis de maestría, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Lehmom D. y Moehle J. (2000), “Seismic performance of well confined concrete bridge columns”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 1998/01.

Lucho M.A. (2012), “Aislamiento elastomérico para el control de estructuras ubicadas en la costa de Guerrero”, Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, UAM Azcapotzalco.

Naeim F. y Kelly J. M. (1999), “Design of Seismic Isolated Structures. From Theory to Practice” Ed JONH WILEY AND SONS, INC.

Nakata, J. K. et al., (1999), “The October 17, 1989, Loma Prieta, California, Earthquake, selected photographs”, U. S. Geological Survey, Obtenido de: [http://geopubs/wr.usgs.gov/dds/dds-29/](http://geopubs.wr.usgs.gov/dds/dds-29/)

Ospina, A., (2012). Método basado en desplazamientos para el diseño y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de concreto reforzado, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín.

Pérez, N. A., & Vásquez, M. J. (2016). UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA FACULTAD DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y AMBIENTE. Managua, Nicaragua. Recuperado de: <http://repositorio.uca.edu.ni/3675/1/UCANI4609.pdf>

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., y Seible, F. (1996), “Seismic Design and Retrofit of Bridges”, Ed JONH WILEY AND SONS, INC.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., y Kowalsky, M. J. (2007), “Displacement-Based Seismic Design of Structures”, IUSS PRESS, Pavia, Italia.

Rivera D, (2005), “Diseño sísmico de columnas de puentes urbanos de concreto reforzado en la ciudad de México”, Tesis de Doctorado, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.

Rivera, D. (2007), Evaluación Simplificada de la Vulnerabilidad Sísmica en Puentes Urbanos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, SGOB.

Rivera D. *et. al.* (2019), “Comportamiento experimental de columnas de puentes de concreto reforzado con moderada cuantía de refuerzo transversal” Memorias de XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, Nuevo León.

Rivera D., Alcocer S. M., Rodríguez G., Aragón J., Flores L., López S. E., Godho G. A. y Sánchez R. (2022), “Desempeño sísmico de columnas de puentes urbanos”, Informe elaborado para: Instituto para la Seguridad de las Construcciones, Gobierno de la Ciudad de México.

Rivera D., *et al.* (2023), “Diseño sísmico de columnas de puentes de concreto reforzado basado en desempeño”, XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.

Sánchez, Rodrigo, (2015), Evaluación del peligro sísmico en el municipio de Naucalpan de Juárez, Edo. de México, Tesis de maestría, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

SCT.IMT (2001), “Proyecto de Puentes y Estructuras”. N.PRY.CAR.6.φ1.φ φ4/ φ1. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México.

Skinner R. G., Robinson W.H. y Mc Verry G.H. (1993), “An Introduction to Seismic Isolation”, Wiley, New York.

Sullivan T. *et. al.* (2003), “The limitations and performance of different displacement based design methods”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, Imperial Collage Press, 201-241.

Zuñiga R. *et. al.* ,(1997), Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Centro nacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Canadá.

Wagner D. (2017), Aislamiento sísmico en edificios prefabricados en la zona de transición de la ciudad de México, Tesis de maestría, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

“¿Qué carreteras están dañadas por el sismo de 7.1 grados?”(20/09/2017), Milenio, Recuperado de: <http://www.milenio.com/estados/carreteras-danadas-sismo-7-1-grados>

ANEXOS

Anexo 1. Espectros de desplazamiento y aceleración absoluta

A continuación, se muestran los espectros de desplazamiento y aceleración absoluta correspondientes a los registros sísmicos mostrados en la tabla 5.

Espectros de Aceleración Absoluta

Datos del Sismo

Fecha UTC:	30/09/1999	Hora UTC:	16:31:14	
Latitud (grados decimales):	15.95	Longitud (grados decimales):	-97.03	Profundidad (km): 16
Magnitud:	Mb= 6.5 Ms= 7.5 Mc= 5.2 Ma= 7.1 Me= 7.6			
Zona:	Oaxaca			
Fuente:	Instituto de Geofísica, UNAM			
Estación:	JAMILTEPEC			

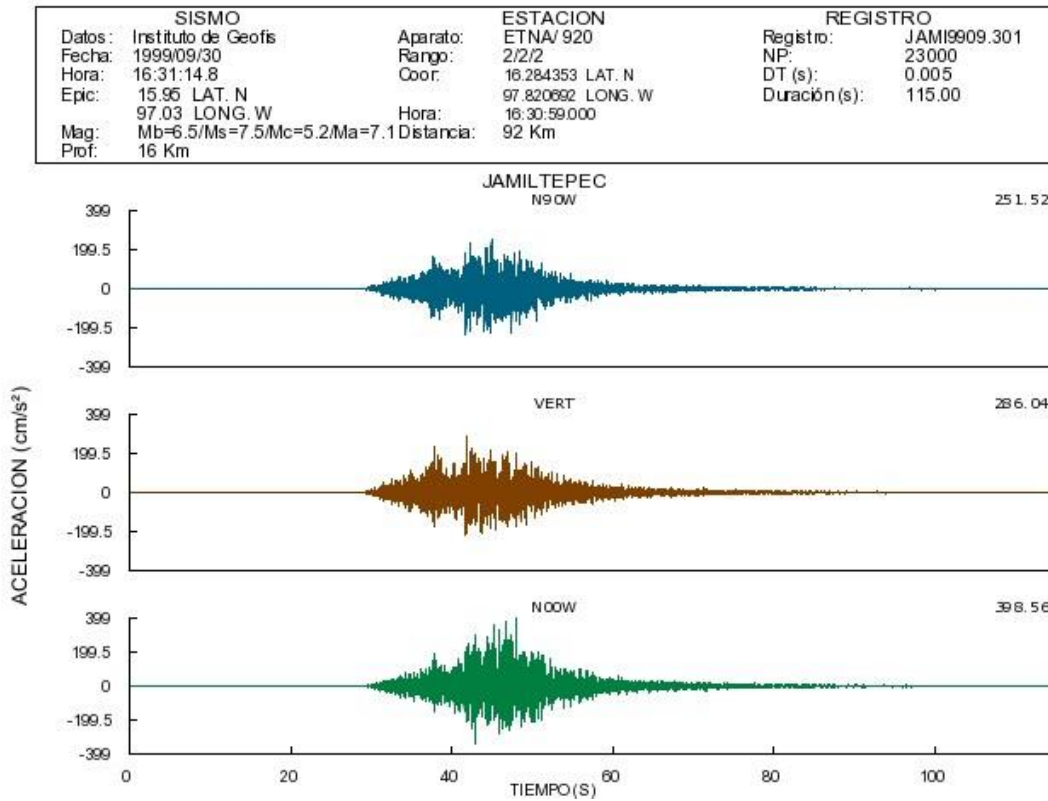


Figura A1 Registro sísmico Estación Jamiltepec, Oaxaca. 30/09/1999

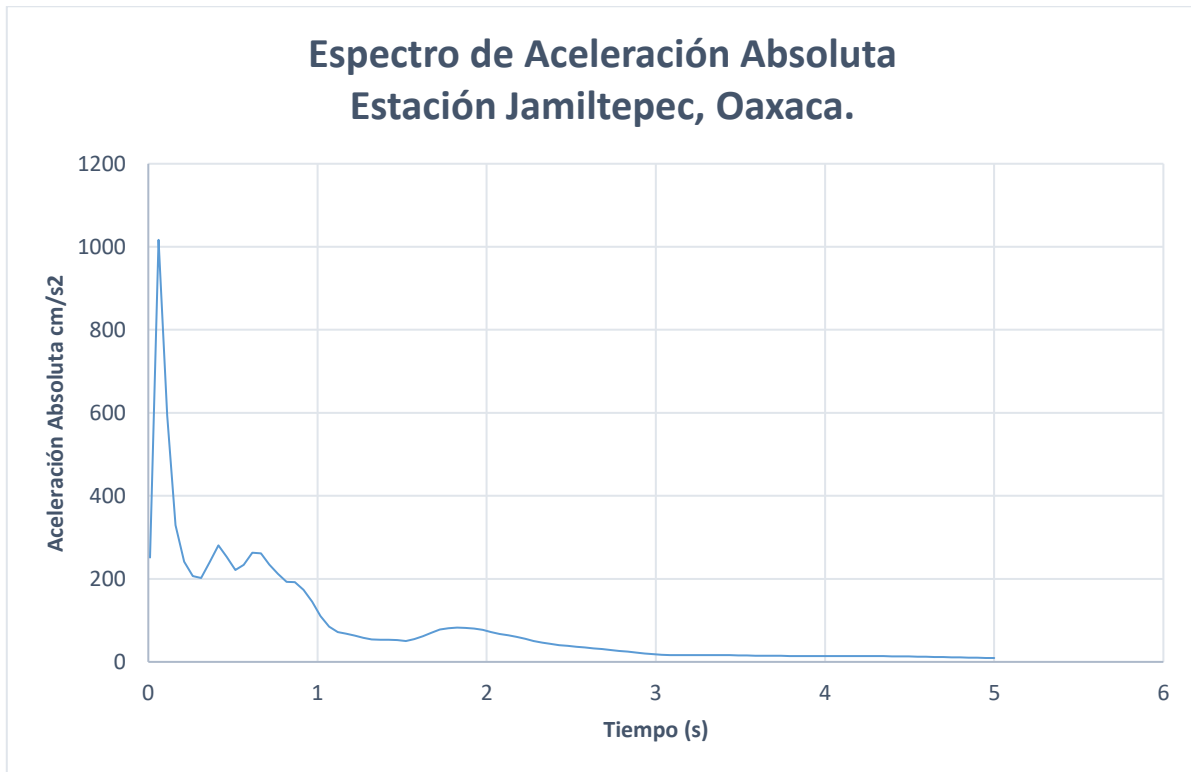


Figura A2 Espectro de aceleración absoluta, Jamiltepec

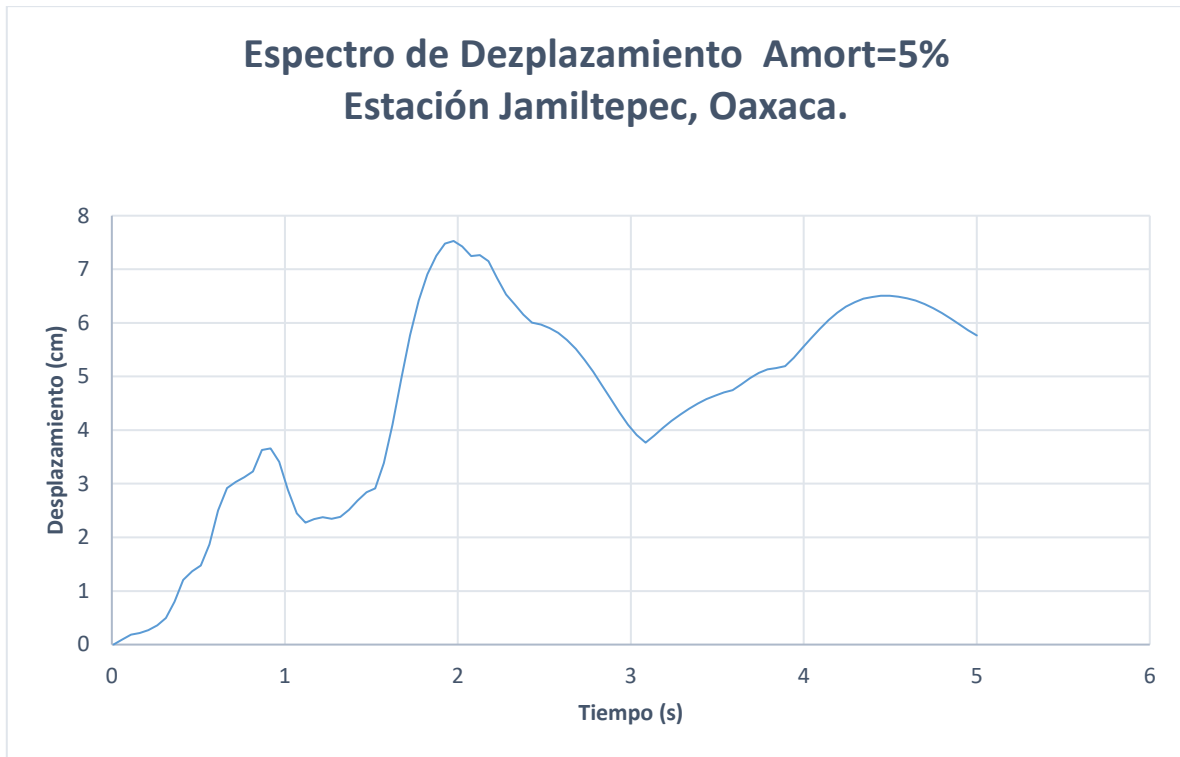


Figura A3 Espectro de desplazamiento, Jamiltepec

Datos del Sismo

Fecha UTC:	08/09/2017	Hora UTC:	04:49:17
Latitud (grados decimales):	14.761	Longitud (grados decimales):	-94.103
		Profundidad (km):	45.9
Magnitud:	M= 8.2		
Zona:	140 km al SUROESTE de PIJIAPAN, CHIS		
Fuente:	Instituto de Geofísica, UNAM		
Estación:	SALINA CRUZ		

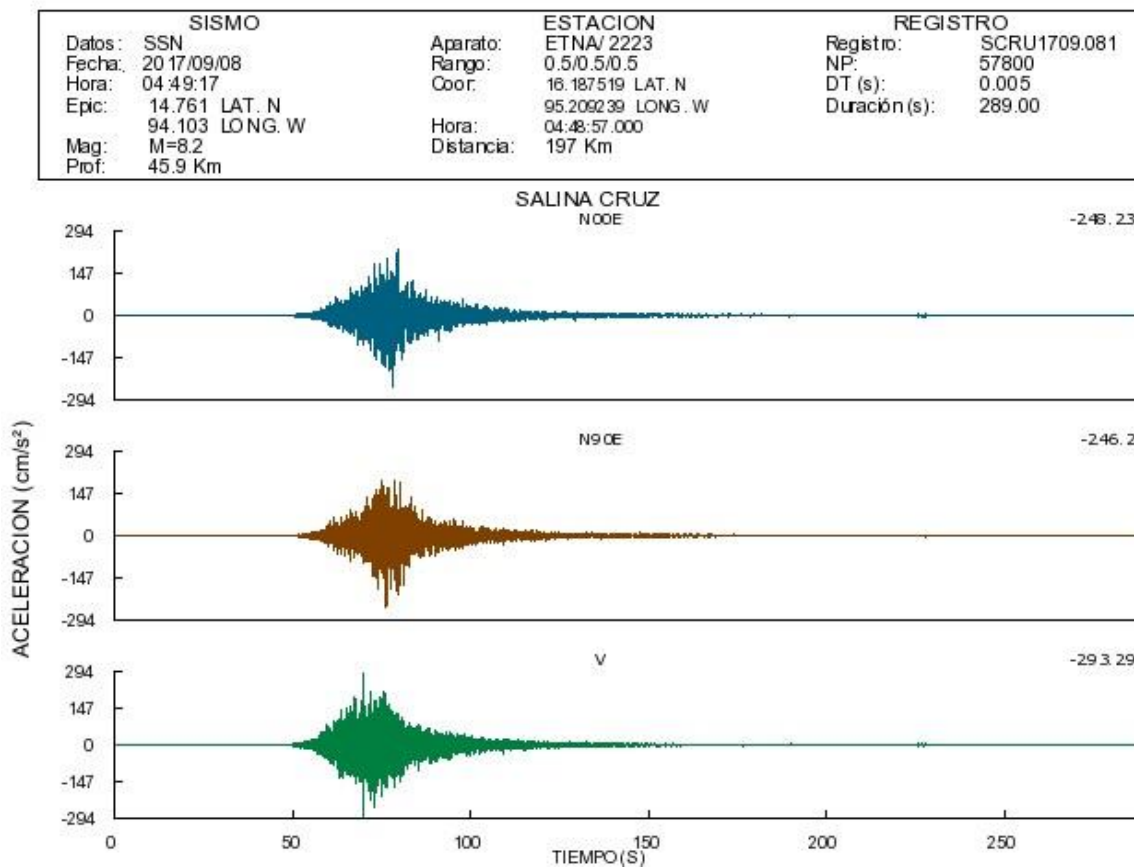


Figura A4 Registro sísmico Estación Salina Cruz, Oaxaca. 08/09/2017

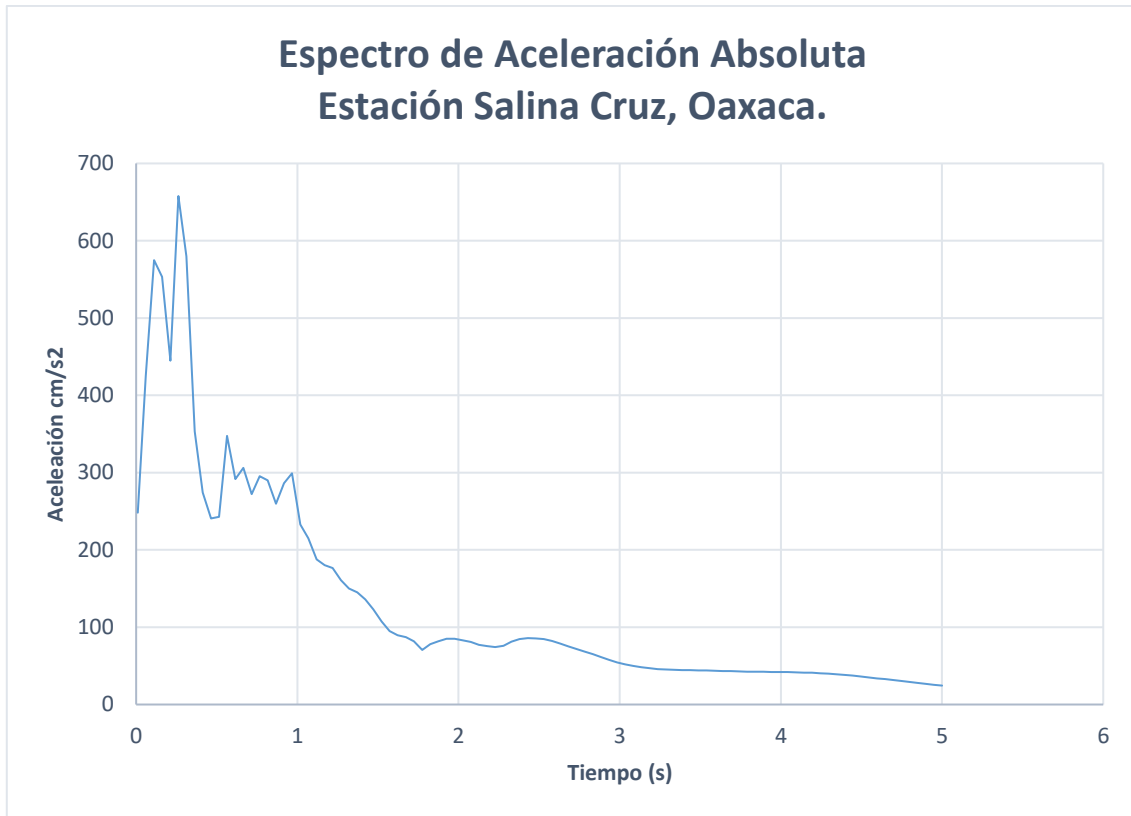


Figura A5 Espectro de aceleración absoluta, Salina Cruz



Figura A6 Espectro de desplazamiento, Salina Cruz.

Datos del Sismo

Fecha UTC:	19/09/2017	Hora UTC:	18:14:40	
Latitud (grados decimales):	18.3353	Longitud (grados decimales):	-98.6763	Profundidad (km): 38.5
Magnitud:	M= 7.1			
Zona:	9 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE			
Fuente:	Instituto de Geofísica, UNAM			
Estación:	TEHUACÁN			

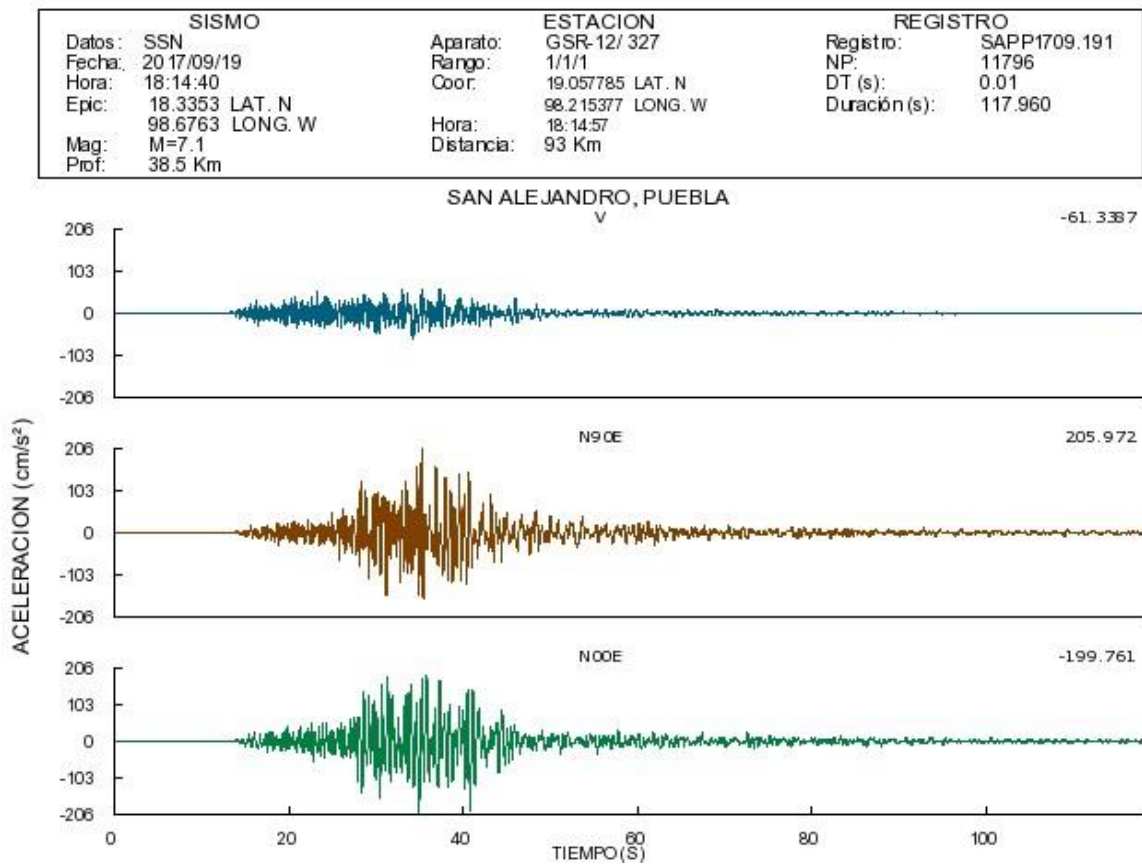


Figura A7 Registro sísmico Estación Tehuacán, Puebla. 19/09/2017

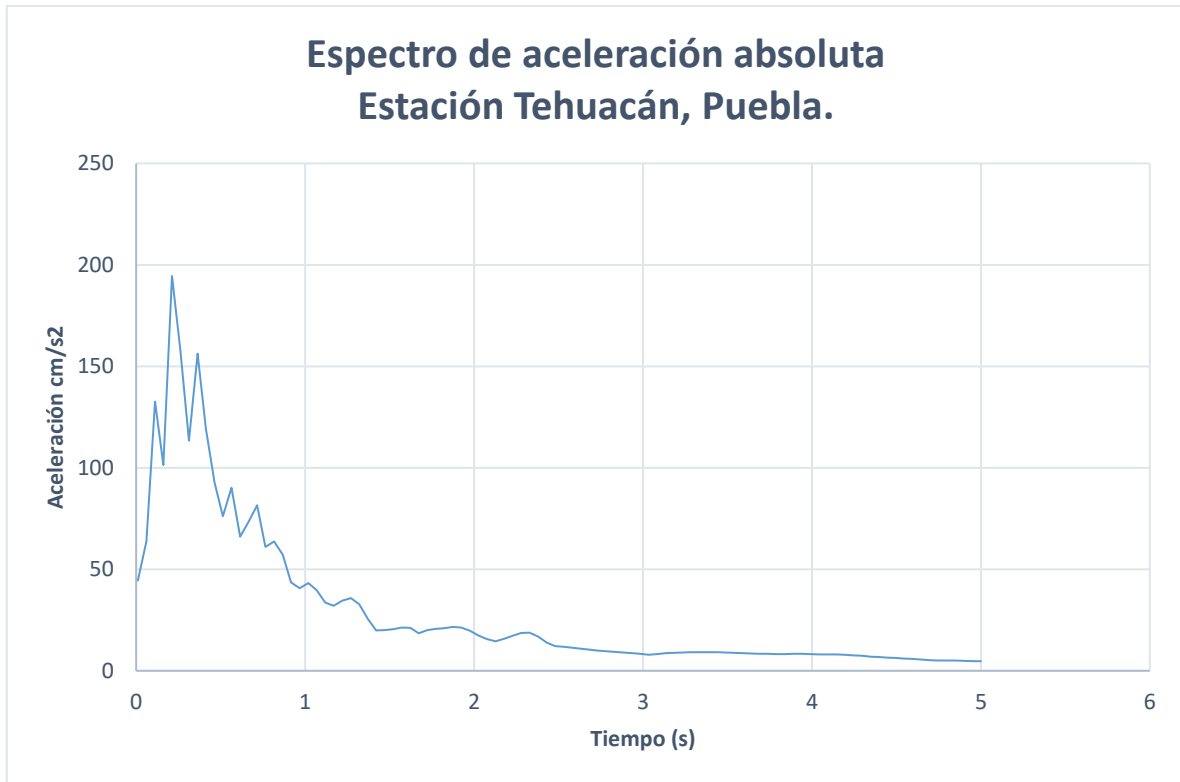


Figura A8 Espectro de aceleración absoluta, Tehuacán

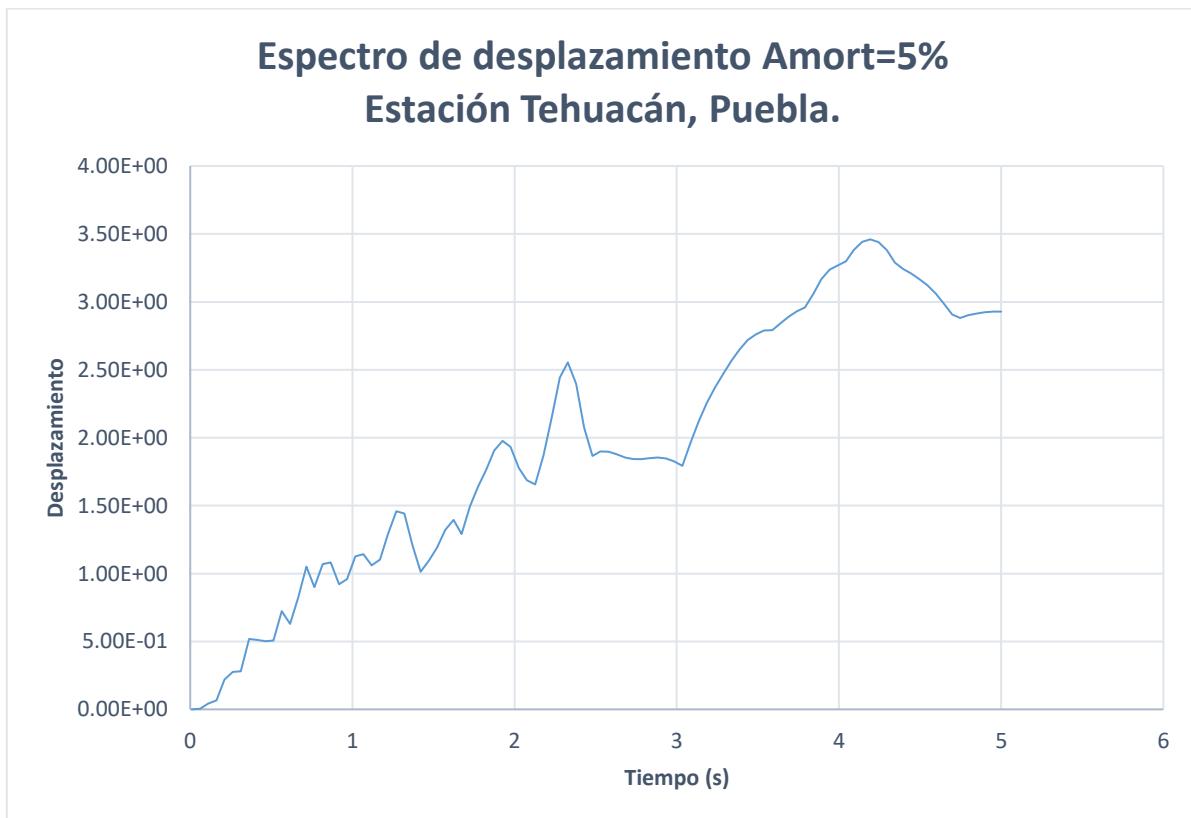


Figura A9 Espectro de desplazamiento, Tehuacán

Anexo 2. Elementos tipo link en el programa SAP 2000

La representación de los aisladores en el modelo de análisis realizado en el programa SAP 2000, se realizó por medio de un sistema de enlace (LINK) entre las vigas correspondientes al cabezal y las vigas AASHTO que conformaban la superestructura, generando así el desacople del sistema con la subestructura. Los requerimientos de entrada de dicho elemento, corresponden a las propiedades mecánicas y físicas que posee el aislador diseñado o bien elegido directamente de tablas proporcionadas por fabricantes de los sistemas de aislamiento. A continuación, se muestra la manera en que los datos de entrada para el aislador, son introducidos en el programa:

1. Para introducir las propiedades de los aisladores, seguiremos la ruta “Define-Section Properties- Link/Support Properties”, dicha ruta abrirá una ventana emergente de la cual se deberá añadir una nueva propiedad “Add New Property”.
2. El primer parámetro a definir, corresponde al tipo de elemento LINK que es necesario modelar, para el caso de este estudio, corresponde un aislador topo “Rubber Isolator”.

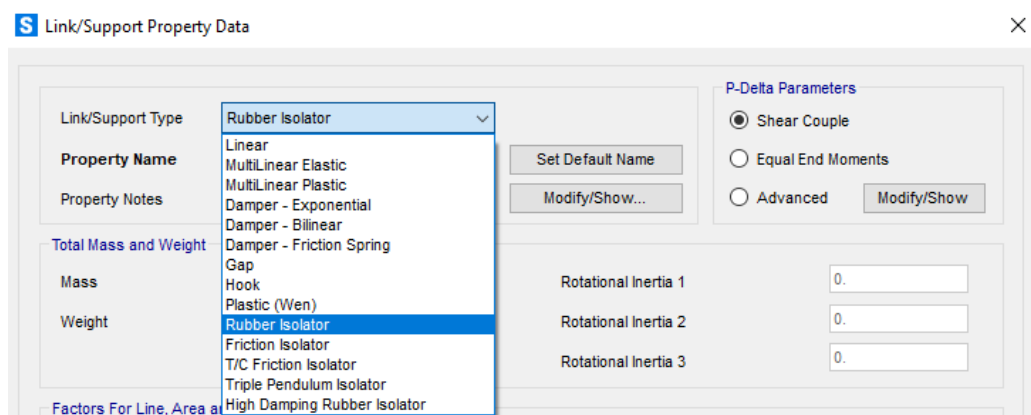


Figura A10 Selección del tipo de elemento link

3. En el apartado “Directional Properties”, se deberán seleccionar las direcciones de análisis consideradas para el diseño del elemento. El programa puede considerar un analizar el elemento en forma lineal o bien, considerar fija una de las direcciones; e incluso un análisis no lineal del elemento. La selección de este criterio dependerá del tipo de análisis considerado por el diseñador.

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Figura A11 Propiedades del aislador en las diferentes direcciones de análisis

4. Para cada una de las direcciones de análisis, se deberá realizar la introducción de las propiedades a considerar, dentro de dichas propiedades y para el caso del aislador de estudio, las propiedades se muestran en la siguiente imagen:

Link/Support Directional Properties ×

Identification

Property Name: LRB

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 17230.976

Effective Damping: 9.4641

Link/Support Directional Properties ×

Identification

Property Name: LRB

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 72.5213

Effective Damping: 9.4641

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.125

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 381.3527

Yield Strength: 4.49

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

Figura A12 Propiedades lineales y no lineales de cada dirección de análisis

donde:

Effective Stiffness: corresponde a la rigidez efectiva en la dirección de análisis del aislador.

Effective Damping: es el amortiguamiento que proporciona el aislador en operación

Distance from End-J: distancia donde se presenta o aplica la fuerza cortante, es recomendable considerar la mitad de la altura total del aislador elastomérico.

Stiffness: rigidez para el análisis no lineal

Yield Strength: Fuerza de fluencia

Post Yield Stiffness Ratio: Rigidez de postfluencia

Anexo 3. Espectros de diseño modificado, espectro de diseño reducido y espectro de desplazamiento para ejemplo de aplicación

1. Espectro de diseño modificado para modelo sin aislamiento sísmico:

Ubicación: Salina Cruz, Oaxaca.

$$Q = 2$$

$$R = 1.5$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.9$$

Amortiguamiento = 5%

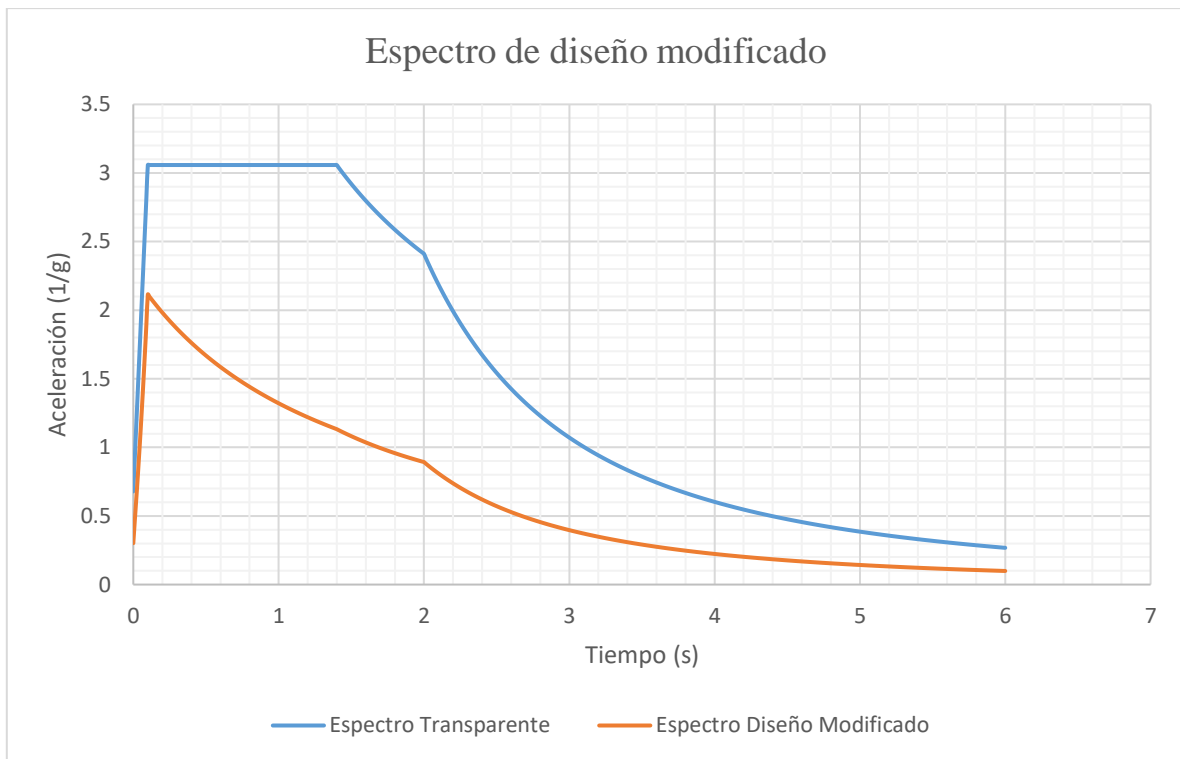


Figura A13 Espectro de diseño modificado

2. Espectro de diseño modificado por amortiguamiento

Ubicación: Salina Cruz, Oaxaca.

$$Q = 2$$

$$R = 1.5$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.9$$

Amortiguamiento = 26.77%

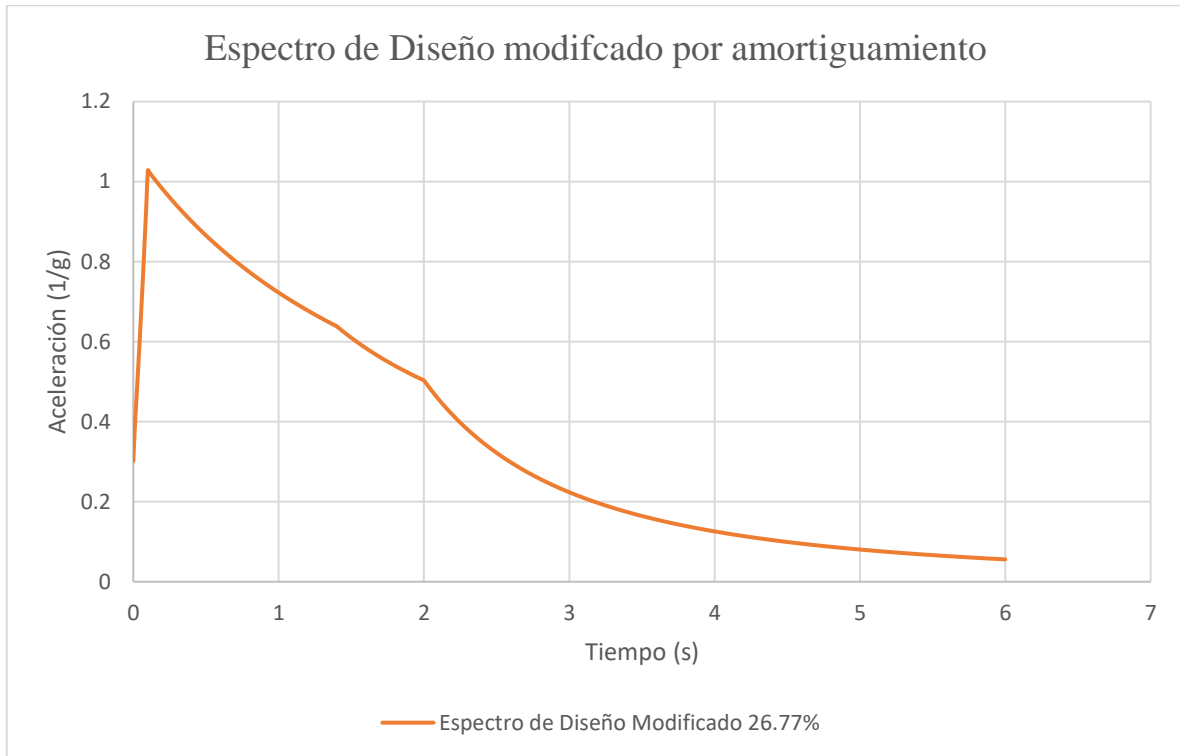


Figura A14 Espectro modificado por amortiguamiento del sistema de aisladores (26.77%)

3. Espectro de diseño reducido

Ubicación: Salina Cruz, Oaxaca.

$$Q = 2$$

$$R = 1.5$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.9$$

Amortiguamiento $\gamma = 5\%$

Amortiguamiento a partir del 80% del periodo objetivo: 26.77%



Figura A15 Espectro de diseño reducido

4. Espectro de desplazamiento

Ubicación: Salina Cruz, Oaxaca.

$$Q = 2$$

$$R = 1.5$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.9$$

Amortiguamiento: 26.77%

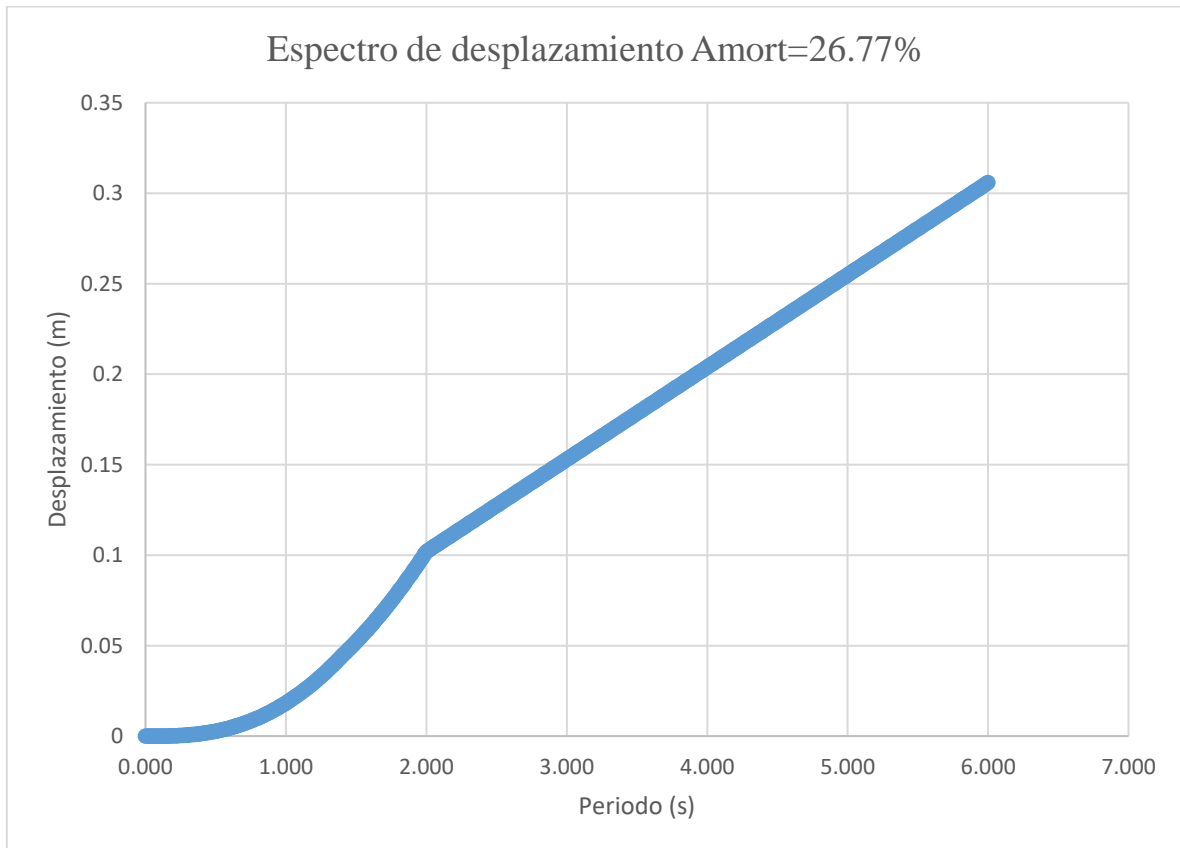


Figura A16 Espectro de desplazamiento