



Análisis de los diferentes tipos de topes sísmicos longitudinales en puentes

Andrés Felipe Grajales Acevedo

Informe de Práctica para optar al Título de Ingeniero Civil

Asesor

Wilber Humberto Vélez Gómez, Doctor

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Grajales, 2023)
Referencia	Grajales Acevedo, A. (2023). <i>Análisis de los diferentes tipos de topes sísmicos longitudinales en puentes</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga.

Jefe departamento: Lina María Berroute Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1. Objetivo general	12
1.2. Objetivos específicos.....	12
2. Marco teórico	13
3. Metodología	35
3.1. Tipos de elementos.....	35
3.1.1. Retenedores basados en rigidez.....	35
3.1.2. Retenedores de disipación de energía	37
3.1.3. Amortiguadores autocentrados.....	41
3.2. Análisis de casos de estudio de cada artículo.....	44
3.2.1. Artículo 1: A new scheme for the seismic retrofit of multi-span simply supported bridges 44	
3.2.2. Artículo 2: Innovative control strategy for seismic pounding mitigation of bridge structures.....	57
3.3. Comparación de la eficiencia de diversos sistemas de retención.....	70
3.4. Limitaciones de los retenedores existentes	72
4. Conclusiones	74
5. Referencias.....	75

Lista de tablas

Tabla 1 Comparación de las propiedades de las aleaciones con memoria de forma de NiTi con acero estructural típico	27
Tabla 2 Respuesta pico del Modelo I bajo excitaciones sísmicas reales.....	66

Lista de figuras

Figura 1 Conexión entre vigas postensadas con retenedores de cables	15
Figura 2 <i>Conexión entre vigas metálicas con retenedores de cables</i>	16
Figura 3 <i>Daños observados en puentes carreteros luego del terremoto del Maule 2010</i>	17
Figura 4 <i>Longitud de asiento de vigas en apoyos intermedios, estribos y ménsulas</i>	17
Figura 5 <i>Retenedor de cable entre vigas y apoyo intermedio</i>	17
Figura 6 <i>Viga desplazada en dirección longitudinal con pérdida de asiento durante un sismo ..</i>	18
Figura 7 <i>Conexión estribo- vigas y viga-viga con retenedores de cables.....</i>	19
Figura 8 <i>Dispositivos Japoneses de restricción de desplazamientos.....</i>	19
Figura 9 <i>Longitud de asiento en planta.....</i>	20
Figura 10 <i>Tope sísmico longitudinal para vigas metálicas y de concreto en estribos.</i>	21
Figura 11 <i>Tope sísmico longitudinal para vigas metálicas y de concreto en apoyos intermedios</i>	21
Figura 12 <i>Componente de un retenedor.....</i>	22
Figura 13 <i>Sujetado de cables envuelto en la viga cabezal</i>	22
Figura 14 <i>Conjunto típico de un retenedor</i>	23
Figura 15 <i>Relación carga-deformación para retenedores.....</i>	23
Figura 16 <i>Conexión de retenedores entre tableros</i>	24
Figura 17 <i>Modelo analítico para retenedores.....</i>	24
Figura 18 <i>Curvas tensión - deformación para SMA. (a) Efecto de memoria de forma; (b) Efecto de superelasticidad.....</i>	26

Figura 19 Configuración de barras de contención con SMA usadas en estribos y apoyos intermedios	29
Figura 20 Relación típica fuerza-deformación de 4 esquemas de reacomodamiento	29
Figura 21 Barra de sujeción de Nitinol SMA	30
Figura 22 Puente aislado adaptado con sujetadores SMA	32
Figura 23 Junta de expansión en puentes con dos configuraciones de retenedores con amortiguadores: a) a través de la junta, b) a través del apoyo	32
Figura 24 Colapso de vanos de puentes en el terremoto de Chi-Chi: a) puente Chang-gang, b) puente Shi-wei.....	34
Figura 25 Función de los retenedores de cables para evitar el desprendimiento	34
Figura 26 Retenedores de acero con placa de anclaje, a) En apoyos, b) Detalles de configuración	35
Figura 27 Aplicación de retenedores FRP en: a) Estribos, b) Apoyos intermedios, c) Ménsulas	36
Figura 28 Retenedores laterales rígidos típico en forma de L: a) Configuración básica, b) Adoptada como dispositivo de protección de rodamientos.....	37
Figura 29 Amortiguadores metálicos en X: a) Configuración típica, b) Histéresis de ensayos cuasiestáticos	38
Figura 30 Puente Rion-Antirion.....	39
Figura 31 Ejemplos de aplicación de amortiguadores viscosos de fluidos	40
Figura 32 Amortiguadores viscoelásticos: a) configuración típica, b) relación fuerza-desplazamiento, y c) curvas de respuesta histerética	41
Figura 33 Histéresis fuerza-desplazamiento en forma de bandera de dispositivos autocentrantes: a) modelo constitutivo analítico, b) histéresis experimental de los dispositivos basados en SMA y c) histéresis experimental de dispositivos autocentrantes híbridos.....	43
Figura 34 Geometría puente analizado en el artículo 1	45
Figura 35 Conexión de los segmentos adyacentes del puente con relleno de juntas y retenedores de cables externos	46
Figura 36 Modelado puente existente analizado en el artículo 1	48
Figura 37 Modelado puente rehabilitado analizado en el artículo 1.....	49
Figura 38 Espectros promedio para los tres tipos de suelo A, B y C.....	51

Figura 39 <i>Formas modales y factores de participación de masa del sistema del puente existente</i>	51
Figura 40 <i>Formas modales y factores de participación de masa del sistema del puente existente</i>	52
Figura 41 <i>Historias temporales de los desplazamientos longitudinales de los tableros del puente existente y rehabilitado (tipo de suelo B, aceleración del suelo 0.16g)</i>	53
Figura 42 <i>Factores PR. (a) en los movimientos longitudinales y (b) en los transversales del tablero del sistema de puente rehabilitado para los 3 tipos de suelo considerados (aceleración del suelo: 0.16g)</i>	54
Figura 43 <i>Factores PR. (a) en los movimientos longitudinales y (b) en los transversales del tablero del sistema de puente rehabilitado para los 3 tipos de suelo considerados (aceleración del suelo: 0.24g)</i>	55
Figura 44 Modelo base de puente aislado con rodamiento LRB	59
Figura 45 Esquemas de la junta de expansión del puente con 3 configuraciones de retenedores: a) a través de la bisagra, b) a través del pilar y c) a través de la bisagra con llave de corte	60
Figura 46 Modelos de golpeteo, retenedores y dispositivos amortiguadores	62
Figura 47 Espectro de respuesta de aceleración de los movimientos sísmicos.....	62
Figura 48 Historia del tiempo de respuesta del pico de desplazamiento	63
Figura 49 Historia del tiempo de respuesta del desplazamiento relativo de la junta de expansión	65
Figura 50 Historia del tiempo de desplazamiento relativo a nivel de LRB	65
Figura 51 Respuesta de la historia del tiempo de la fuerza de impacto con/sin SAD.....	68
Figura 52 Respuesta de la historia del tiempo de aceleración con/sin SAD	68

Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Determinación de la reducción porcentual PR	53
---	----

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SMA	Aleación con memoria de forma
FRP	Polímeros reforzados con fibra
MR	Fluidos magnetorreológicos
ER	Fluidos electrorreológicos
AASHTO	Asociación Americana de funcionarios de Carreteras y Transporte

Resumen

Este estudio examina el diseño sísmico de puentes y aborda factores cruciales para garantizar su seguridad y durabilidad en zonas de amenaza sísmica alta. El objetivo del diseño sísmico de puentes es reducir las fuerzas generadas, especialmente debido a la energía sísmica, en el rango inelástico. Esto permite que la estructura experimente deformaciones sin colapsar al distribuir la capacidad de disipación de energía de acuerdo con la ubicación y relevancia de cada elemento estructural dentro del puente.

Para lograr esto, se han creado numerosos componentes y materiales para el diseño sísmico de puentes, como: retenedores de cables, topes sísmicos, sujetadores, SMA y FRP. Mientras que los topes sísmicos se diseñan para disipar la energía sísmica y reducir la amplitud de los desplazamientos de la superestructura, los retenedores de cables se han investigado para mejorar su eficiencia. El propósito de los sujetadores es transferir las cargas sísmicas a la subestructura, y se han sugerido varios materiales, incluidos cables de acero, fibra de carbono y SMA. En el análisis sísmico, el objetivo es crear estructuras seguras, eficientes y duraderas. Para lograr esto, es necesario analizar los desplazamientos longitudinales y la distribución de la capacidad de disipación de energía de acuerdo con la ubicación y relevancia de cada elemento estructural del puente. Además, se hace hincapié en la importancia de la longitud de asiento de las vigas en estribos, ménsulas y apoyos intermedios, ya que una longitud de asiento demasiado corta puede causar desplazamientos excesivos entre la superestructura y la subestructura.

Palabras clave: Puentes, desplazamiento, sismo, retenedor, cable, colapso, disipación de energía, seguridad.

Abstract

This study examines the seismic design of bridges and addresses crucial factors to ensure their safety and durability in areas of high seismic hazard. The objective of seismic design of bridges is to reduce the forces generated, especially due to seismic energy, in the inelastic range. This allows the structure to experience deformations without collapse, distributing the energy dissipation capacity according to the location and relevance of each structural element within the bridge.

To achieve this, numerous components and materials have been developed for the seismic design of bridges, such as: cable restraints, seismic buffers, bracing, SMA and FRP. While seismic buffers are designed to dissipate seismic energy and reduce the amplitude of superstructure displacements, cable restraints have been investigated to improve their effectiveness. The objective of the restraints is to transfer the seismic loads to the substructure, and several materials have been suggested, such as steel, carbon fiber, and SMA cables. In seismic analysis, the goal is to create safe, efficient and durable structures. To achieve this, it is necessary to analyze the longitudinal displacements and the distribution of energy dissipation capacity according to the location and relevance of each structural element of the bridge. In addition, the importance of the length of girder saddles at abutments, brackets and intermediate supports is emphasized, as well as the fact that too short a saddle length can lead to excessive displacements between the superstructure and the substructure.

Keywords: Bridges, displacement, earthquake, restraint, cable, collapse, energy dissipation, safety.

Introducción

El ingenio del ser humano a través del tiempo ha logrado que se construyan obras de gran magnitud como túneles, puentes, vías, edificios, hidroeléctricas entre otros, logrando que cada vez tengan mejor rendimiento y durabilidad, esto gracias a los avances tecnológicos y a las experiencias de aquellos proyectos que no funcionaron como se esperaba, ya que esto hace que se estén buscando constantemente nuevas soluciones y poder lograr que los nuevos proyectos si tengan éxito.

Un desafío de la ingeniería es hacer que las obras hidráulicas y viales sean más seguras y resistentes, lo que alarga su vida útil y garantiza la integridad de las personas, sin dejar de lado la parte económica. Esto se logra mediante la creación de nuevos materiales de construcción que permitan aumentar la resistencia y así no requerir de tanto material. Esto garantiza que las estructuras resistan las cargas para las cuales fueron diseñadas.

Una de las estructuras más importantes para la infraestructura vial de un país son los puentes, estos permiten la conectividad entre varios lugares, el transporte de alimentos u otro tipo de productos para satisfacer las necesidades de la comunidad y disminuyen el tiempo de transporte. Ya que Colombia es un país con bastante relieve, se hace necesario que en el trazado de las vías se implementen puentes que garanticen la movilidad sobre fuentes hídricas y topografías escarpadas (Soldano Exequiel, 2018).

Un análisis importante en el diseño de puentes es el análisis sísmico, este permite conocer la respuesta del puente ante un terremoto, conocer las fuerzas que actuaran en el puente e incluso las deformaciones y desplazamientos resultantes del terremoto, los desplazamientos que se pueden presentar son tanto transversales como longitudinales y pueden controlarse con varios dispositivos.

En las últimas décadas, que las estructuras de los puentes se deterioren rápidamente se a convertido en un problema técnico y económico en varios países, incluso en los más desarrollados. Los puentes que suelen tener problemas más intensos son los que tienen vigas simplemente apoyadas y que constan de varios tramos, ya que la mayoría de estos fueron diseñados sin contar con las fuerzas sísmicas que se podían presentar (DesRoches et al., 2003).

Este problema es más intenso cuando el espacio que hay entre dos elementos adyacentes se cierran debido a la acción de las fuerzas sísmicas, esto induce fuerzas de alto impacto entre los tramos que están interactuando (Saadeghvaziri & Yazdani-motlagh, 1999). Este fenómeno es similar en la dirección longitudinal del puente, ya que se producen desplazamientos que cierran las juntas de expansión, en los estribos puede darse un deslizamiento y/o rotación si el suelo no es muy rígido, esto produce un deslizamiento no lineal debido al efecto que tiene la interacción el suelo con la estructura y la relación que tiene la fuerza con el desplazamiento y la junta de dilatación (Vierya, 2017).

Aunque pueden existir varios tipos de dispositivos que ayuden a controlar los desplazamientos en los puentes y mejorar su comportamiento antes eventos sísmicos, los nuevos elementos estructurales, que tienen la capacidad de controlar de manera pasiva, la respuesta del puente o aumentar su amortiguamiento y respetando la estática son ampliamente utilizados (Mitoulis et al., 2013), este trabajo se centrará en los topes sísmicos, específicamente los longitudinales, amortiguadores y retenedores de cable, analizando los distintos tipos que existan de este, comportamientos, ventajas y desventajas realizando una revisión extensa de diversa bibliografía que permita concluir la mejor alternativa teniendo en cuenta la facilidad constructiva, la vida útil y la resistencia.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Analizar los topes sísmicos longitudinales utilizados en puentes, identificando sus principales características, aplicaciones y efectividad en la mejora del comportamiento estructural frente a fuerzas sísmicas.

1.2. Objetivos específicos

- Investigar los diferentes tipos de topes sísmicos longitudinales.
- Analizar cómo se aplican los topes sísmicos longitudinales en los estribos y apoyos intermedios de puentes.
- Evaluar los beneficios que ofrecen los topes sísmicos longitudinales en términos de seguridad y estabilidad estructural.
- Identificar las ventajas y desventajas de los topes sísmicos longitudinales.
- Concluir en qué casos es favorable el uso de los topes sísmicos longitudinales.

2. Marco teórico

Las actuales metodologías utilizadas en el diseño sísmico de puentes se fundamentan en la idea de dimensionar una estructura con un refuerzo interno en sus elementos, con el propósito de disipar las fuerzas generadas, especialmente debido a la energía sísmica, en el rango inelástico. Esto permite que la estructura experimente deformaciones sin llegar al colapso, distribuyendo la capacidad de disipación de energía de acuerdo a la ubicación y relevancia de cada elemento estructural dentro del puente. Sin embargo, esta distribución no tiene en cuenta la deformación alcanzada por dichos elementos ni sus respectivos desplazamientos (Ospina, 2012).

Los puentes son por así decirlo, la columna vertebral de las líneas de transporte. Es vital para la sociedad mantenerlos y permitir que tengan una mayor capacidad de transporte, especialmente en momentos como evacuación y reconstrucción, como en los casos en los que ocurra un fuerte terremoto o huracanes. Recientemente los daños por terremotos han resaltado la vulnerabilidad de los puentes existentes cuando se dan fuertes movimientos del suelo (Dong et al., 2011). En el diseño de puentes siempre se busca obtener estructuras que sean seguras, eficientes y durables, para esto es indispensable el análisis de los desplazamientos transversales y longitudinales, pero en este trabajo solo se estudiarán los longitudinales, estos desplazamientos son causados por diversos factores como la carga de tráfico, efectos de la temperatura o debido a fuerzas sísmicas, siendo las fuerzas sísmicas las que serán analizadas en este trabajo. El puente de varios vanos simplemente apoyado es de los más comunes en la construcción de puentes del centro y sureste de Estados Unidos (Choi et al., 2004), a menudo este tipo de puentes se construyen con juntas para adaptarse a las deformaciones derivadas de la temperatura y el tiempo, las cuales actúan como cortes físicos en la superestructura del puente (Shrestha et al., 2017). El golpeteo de segmentos de superestructuras adyacentes en los puentes durante un sismo severo puede causar daños estructurales significativos, aunque esto solo sea un daño local en la cara de contacto, transfiere grandes fuerzas sísmicas laterales entre tableros, esto resulta en un cambio significativo en la respuesta sísmica de todo el sistema del puente (Abdel Raheem & Hayashikawa, 2008). Una de las principales vulnerabilidades de estos puentes es el colapso debido al desprendimiento de los tableros en los estribos y apoyos intermedios. Esto se produce cuando el desplazamiento relativo en el tablero supera el ancho de asiento disponible (DesRoches et al., 2003). Una vez se da

el colapso del vano, las rutas son cortadas directamente, retrasando en gran medida la operación de rescate tras el terremoto. Por lo general, hay dos tipos de medidas pasivas para evitar el desprendimiento sísmicos en los puentes, una de ellas es, la longitud mínima de apoyo y la segunda son, dispositivos de contención para evitar el desprendimiento (Xiang et al., 2019).

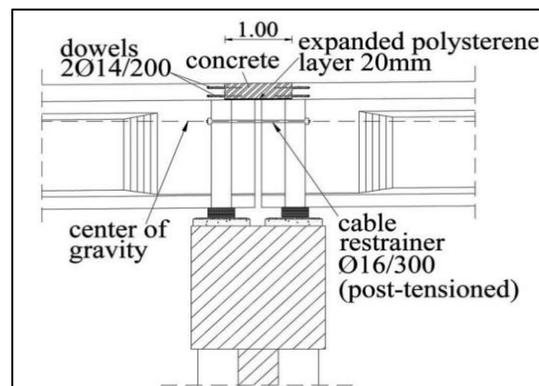
Los daños que relacionan golpes y colapsos se han observado en muchos terremotos importantes como lo son, el terremoto de Christchurch de 2011, el de Chile de 2010, el de Wenchuan de 2008, el de Yogyakarta de 2006, entre otros (Shrestha et al., 2017). En ocasiones se presentan eventos sísmicos, pero no se da el desplome de la estructura, por esto surge la necesidad de desarrollar alternativas eficientes de rehabilitación sísmica (Mitoulis et al., 2013). Existen dos alternativas que se pueden adoptar, la primera se basa en colocar refuerzos convencionales, que aumentan la resistencia de la estructura para satisfacer la demanda (Mitoulis et al., 2013), por lo general se utilizan elementos de hormigón, acero o materiales compuestos (Mitoulis et al., 2013). La segunda alternativa se caracteriza como “indirecta” y consta en reducir la demanda de modo que su capacidad existente sea suficiente para resistir la carga sísmica, esta alternativa generalmente implica que se deban utilizar sistemas de protección contra sismos como cojinetes y amortiguadores viscosos, también se suelen introducir aleaciones con memoria de forma (SMA) para reducir los desplazamientos relativos de los segmentos adyacente (Mitoulis et al., 2013). Aunque no es aplicable a todos los puentes y a cualquier condición, se ha demostrado que este sistema es una alternativa rentable en comparación a la primera alternativa (Diciceli et al., n.d.), pero el uso de aislamiento requiere que los elementos tengan grandes espacios libres entre ellos, por lo que el aislamiento es bueno en casos donde no es practico o no se desea rehabilitar columnas o cimientos por medios convencionales (Mitoulis et al., 2013).

Por la falta de redundancia estructural, los puentes presentan daños severos y por lo general esto lleva al colapso durante los terremotos. En puentes con apoyos relativamente cortos, la frecuencia natural de vibración está en el rango de frecuencias de los movimientos sísmicos del suelo, particularmente cuando están cimentados en rocas o suelos duros. Solo el aumento de la resistencia de los miembros del puente no será eficaz ni antieconómico, a menos que se reduzca la transmisión de las fuerzas sísmicas y energía a la estructura (Raheem & Hayashikawa, n.d.).

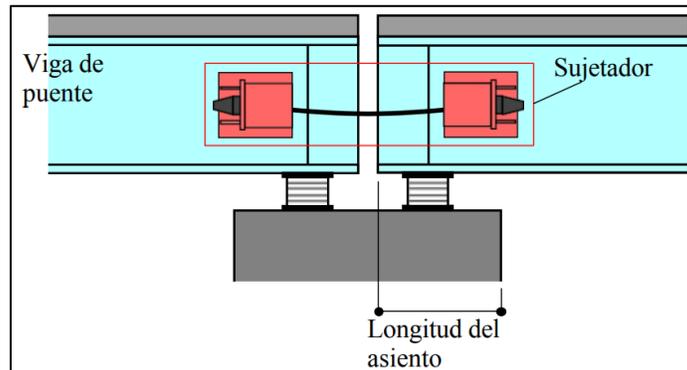
Cuando se trata de rehabilitación de puentes se suelen tener medidas rentables y eficientes que no afecten mucho el costo, ya que el costo de una intervención influye en las decisiones y el diseño. Un dispositivo que permite reducir la posibilidad de que las juntas entre elementos se desplacen son los retenedores de cables (AASHTO, 2001). La función de estos retenedores es evitar que la superestructura se desplace de la subestructura a causa de sismos de mayor magnitud a los supuestos en el diseño sísmico. Estos retenedores de cables son usados para conectar elementos adyacentes en los puentes como vigas con estribos o vigas con vigas (Mitoulis et al., 2013) y la longitud de apoyo es la distancia mínima que debe estar apoyada la viga en los apoyos. Se espera que este sistema de contención de puentes garantice que el desplazamiento relativo entre la superestructura y subestructura no supere la longitud de asiento de la viga (Tamai et al., 2020). Durante el diseño de la longitud mínima de apoyo, es fácil acomodar el movimiento de la superestructura del puente durante los terremotos sin que se caigan los vanos. Sin embargo, esta medida es efectiva principalmente para terremotos leves o moderados, donde los desplazamientos de la superestructura no sean muy grandes. En caso de que se produzcan terremotos más intensos de lo previsto, es probable que los desplazamientos sean excesivamente grandes y requieran longitudes de apoyo mucho mayores. Sin embargo, construir una subestructura sobredimensionada con grandes longitudes de apoyo no es factible debido a consideraciones estéticas y económicas, por esto se propone la utilización de retenedores pasivos de prevención de asientos con el fin de superar las limitaciones de las longitudes de apoyo excesivas mediante la contención de desplazamientos sísmicos (Xiang et al., 2019).

Figura 1

Conexión entre vigas postensadas con retenedores de cables



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

Figura 2*Conexión entre vigas metálicas con retenedores de cables**Nota.* Fuente (Tamai et al., 2020).

Chile se encuentra en una zona de subducción altamente activa y ha experimentado varios terremotos significativos en los últimos años, con magnitudes superiores a $M_w=8,0$. Estos incluyen el terremoto del Maule de 2010 ($M_w=8,8$), el terremoto de Iquique de 2014 ($M_w=8,2$) y el terremoto de Illapel de 2015 ($M_w=8,3$). Estos eventos han puesto a prueba el diseño, la construcción y el desempeño sísmico de la infraestructura civil en Chile. Los puentes carreteros, en particular, han sufrido graves daños e incluso colapsos durante estos terremotos. Se ha observado que la mayoría de los puentes dañados o colapsados son de vigas continuas de hormigón pretensado con varios vanos simplemente apoyados. El daño se atribuye a la rotación en el plano de la plataforma, lo cual provoca desplazamientos excesivos en la superestructura y el desprendimiento de los vanos (Bazaez & Vega, 2018).

Los puentes presentaron desplazamientos excesivos entre la superestructura y la subestructura, como se muestra en la **Figura 3**. Esto se debió a la falta de dispositivos efectivos para prevenir el colapso, así como a la corta longitud del asiento (MOP, 2002).

Figura 3

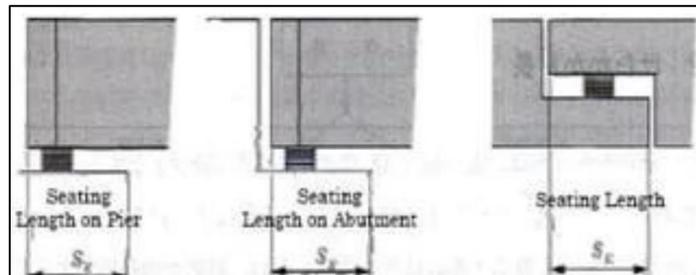
Daños observados en puentes carreteros luego del terremoto del Maule 2010



Nota. Fuente (Bazaez & Vega, 2018).

Figura 4

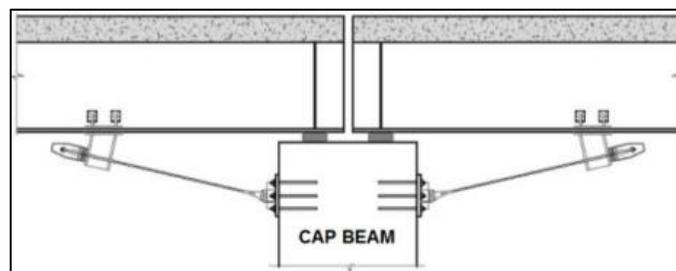
Longitud de asiento de vigas en apoyos intermedios, estribos y ménsulas



Nota. Fuente (Shrestha et al., 2017; Unión & Guzmán, 2010).

Figura 5

Retenedor de cable entre vigas y apoyo intermedio



Nota. Fuente (Bazaez & Vega, 2018).

Los retenedores de cables se usaron por primera vez en Estados Unidos luego de que varios puentes de varios vanos colapsaran debido al terremoto de San Francisco, California, en 1971 (Jennings et al., 1971), por lo que Caltrans inicio la modernización de sus puentes con el fin de evitar que se rompieran los asientos después de un terremoto, ya que durante este terremoto muchos puentes con un ancho de asiento estrecho colapsaron debido a los movimientos longitudinales excesivos en las juntas de expansión y de soporte (Shrestha et al., 2017). Los retenedores de cable son la estrategia de rehabilitación menos costosa y más adaptada y luego del terremoto de San Francisco se usaron extensivamente retenedores de cable para mitigar las fallas en puentes con asientos estrechos, además también se usaron en puentes que si tuvieran una aceptable longitud de asiento con el fin de evitar futuras fallas (Shrestha et al., 2017). Luego de los terremotos de Loma Prieta de 1989 y Northridge de 1994 se comprobó la efectividad de los retenedores de cables, ya que los daños en los puentes fueron limitados (DesRoches et al., 2003). Estados como Carolina del Sur, Indiana y Missouri, elaboraron especificaciones para la rehabilitación de puentes con retenedores de cables. (DesRoches et al., 2003).

Figura 6

Viga desplazada en dirección longitudinal con pérdida de asiento durante un sismo



Nota. Fuente (Tandon, 2005).

El terremoto de Hanshin de 1995 en Japón, provocó el desprendimiento de varios puentes por la excitación sísmica, por lo que se adoptaron diversos tipos de contramedidas contra el colapso de puentes, debido a los grandes daños presentados se modificaron significativamente las directrices de los puentes, por lo que en la actualidad el sistema de prevención de colapso de puentes está bien definido en este país (Tamai et al., 2020), en estas directrices se especifica la

longitud mínima de asiento que deben tener las vigas y se exige la instalación de anclajes y estructuras de limitación del desplazamientos lateral en los puentes, de acuerdo con las especificaciones japonesas de diseño sísmico para puentes de carretera (Tamai et al., 2020).

Figura 7

Conexión estribo- vigas y viga-viga con retenedores de cables

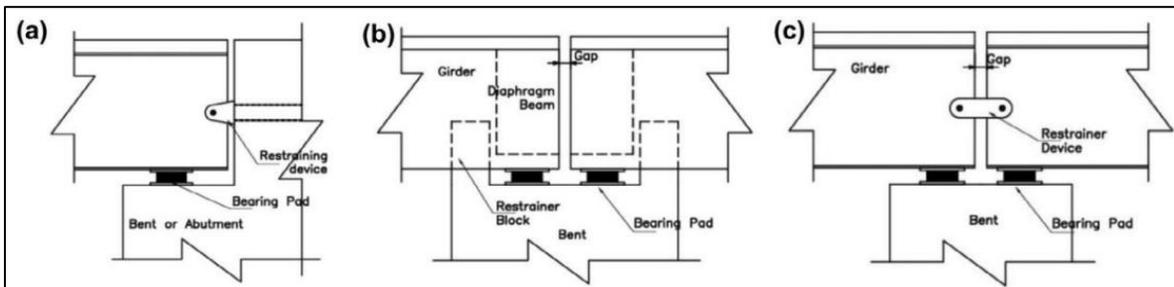


Nota. Fuente (Tamai et al., 2020).

Aunque las construcciones típicas japonesas no utilizan retenedores de cables flexibles como en Estados Unidos, sino que utilizan dispositivos de prevención de caídas que restringen el desplazamiento relativo entre elementos adyacentes, en la **Figura 8** se presentan 3 ejemplos de esto como conexión viga-subestructura (a), dispositivos que sobresalen desde el apoyo hasta la viga (b) y dispositivos que conectan dos vigas (c) (Shrestha et al., 2017).

Figura 8

Dispositivos Japoneses de restricción de desplazamientos



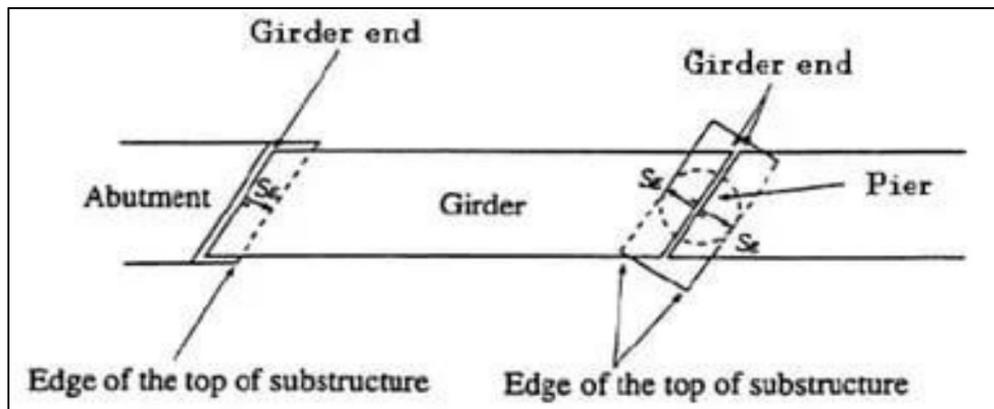
Nota. Fuente (Shrestha et al., 2017).

Con respecto a la situación de trabajo de un retenedor, la carga máxima real que actúa sobre este viene definida por la masa compartida de la superestructura, la rigidez del cable, la velocidad de actuación, el tipo de amortiguamiento, etc., ya que la superestructura presenta varias velocidades de colisión, aunque esto no se refleja en el método de diseño y en cambio se ha utilizado durante mucho tiempo un enfoque estereotipado y directo por lo que se da la preocupación de que la carga actuante supere temporalmente la de diseño (Tamai et al., 2020).

Los retenedores de cables también suelen usarse en casos donde un puente tenga múltiples vanos continuos y además sea demasiado esviado, ya que la longitud de apoyo puede llegar a ser muy grande por lo que esta debe ser perpendicular al eje como se muestra en la **Figura 9**, algunas medidas que se pueden tomar son: disminuir el ángulo del esviaje, colocar topes sísmicos tanto transversales como longitudinales (retenedores de cables), esto con el fin de prevenir la falta de longitud de apoyo (Unión & Guzmán, 2010). En caso de optar por topes sísmicos longitudinales, dichos topes deben incluirse en los apoyos donde se encuentran las juntas de dilatación del tablero (Unión & Guzmán, 2010).

Figura 9

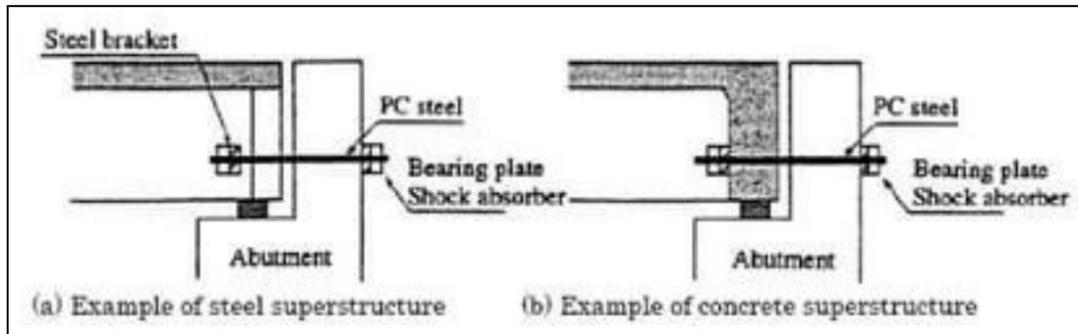
Longitud de asiento en planta



Nota. Fuente (Unión & Guzmán, 2010).

Figura 10

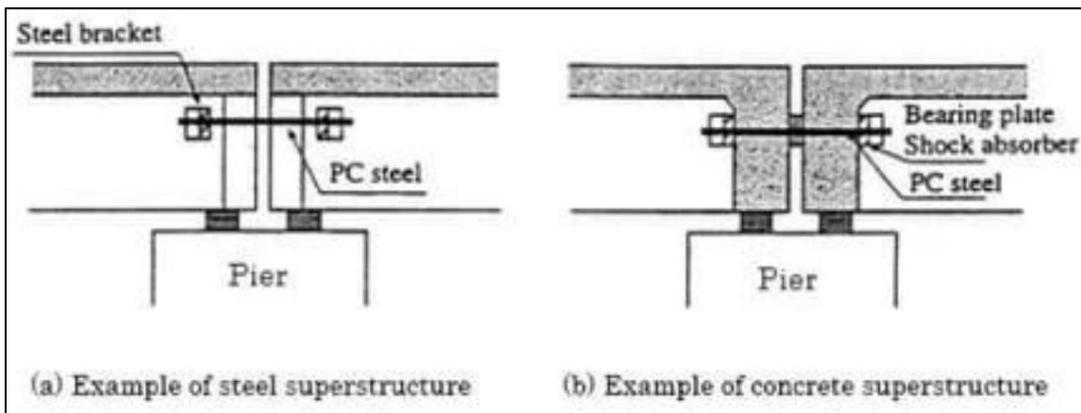
Tope sísmico longitudinal para vigas metálicas y de concreto en estribos.



Nota. Fuente (Unión & Guzmán, 2010).

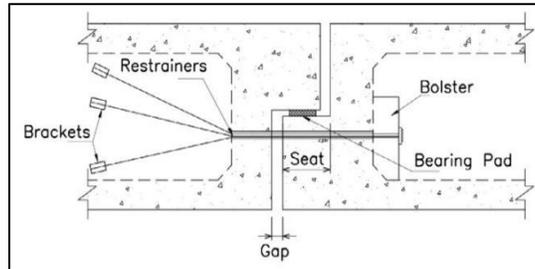
Figura 11

Tope sísmico longitudinal para vigas metálicas y de concreto en apoyos intermedios.



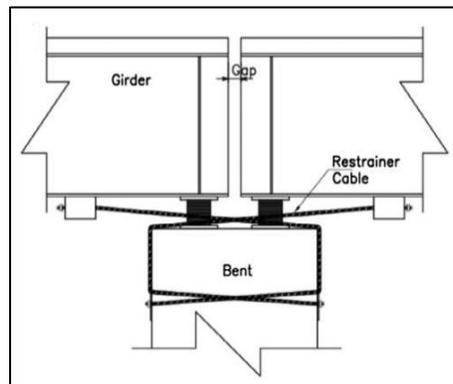
Nota. Fuente (Unión & Guzmán, 2010).

En California se usan cables típicos de acero de 19 y 32 mm de diámetro de alta resistencia, están hechos de torones de 6*19 galvanizados con un límite elástico de 174 kN, las varillas de acero de alta resistencia tienen un límite elástico de 827 Mpa y una resistencia última de 1034 Mpa, inicialmente tiene un módulo de elasticidad de 69 Gpa, los retenedores de cables de uso común tienen una longitud de 6.1 m con la facilidad de estirarse aproximadamente 107 mm en el límite elástico y 267 mm en caso de falla. Los retenedores están diseñados para permanecer en el rango elástico usando solamente la capacidad del resorte, mientras que la energía sísmica es disipada por las bisagras plásticas de este, en la **Figura 12** se muestra un esquema más detallado de los componentes de un retenedor.

Figura 12*Componente de un retenedor*

Nota. Fuente (Shrestha et al., 2017).

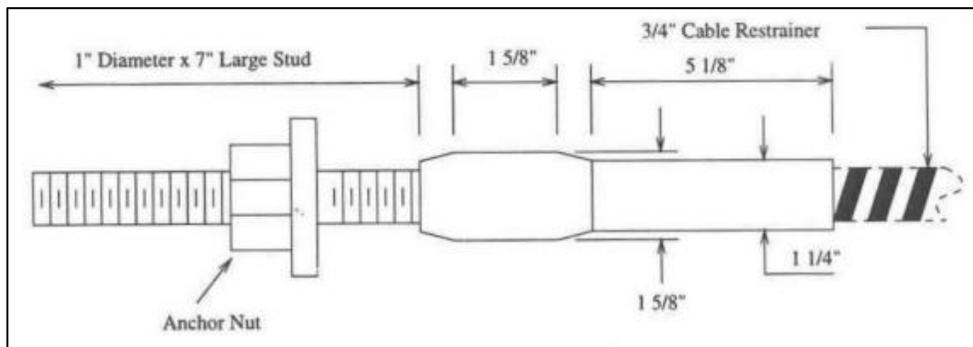
Para puentes con vigas metálicas o de concreto simplemente apoyadas en vigas cabezales, hay una gran variedad de configuraciones de retenedores para evitar que se den los desplazamientos longitudinales. Si los apoyos son suficientemente fuertes, los retenedores pueden colocarse de forma que envuelvan la viga cabezal como se muestra en la **Figura 13**, esto proporciona sujeción adicional a la superestructura. Por lo general es preferible que los retenedores sean entre viga y viga como se muestra en la **Figura 11** cuando la fuerza adicional aplicada por los elementos de restricción a la parte dañada pueda afectar los pilares (Shrestha et al., 2017). Ya que en general la unión entre vigas es menos deseable porque las vigas no están directamente unidas al pilar en el que están asentadas. Durante un terremoto fuerte, la columna flexible puede experimentar grandes deflexiones, lo que puede provocar el desplome si las vigas no están unidas directamente a los apoyos (Shrestha et al., 2017).

Figura 13*Sujetado de cables envuelvo en la viga cabezal*

Nota. Fuente (Shrestha et al., 2017).

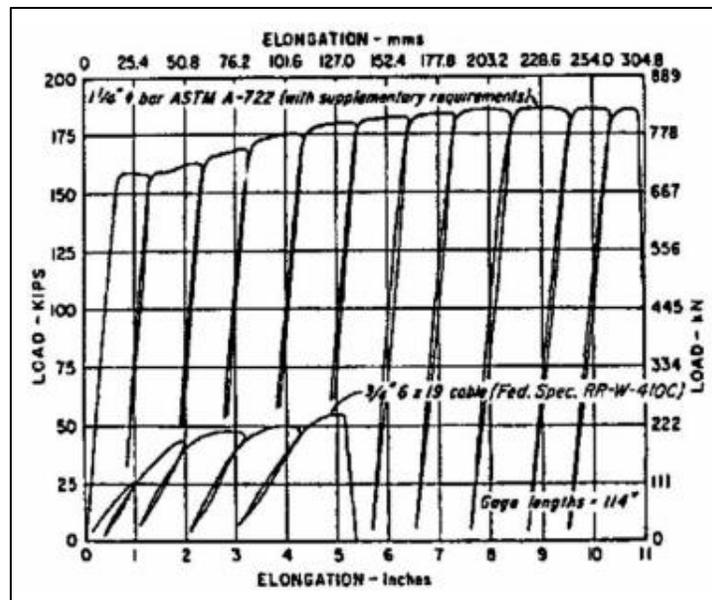
Un retenedor está compuesto por cables con accesorios estampados, espárragos, tuercas y tensores los cuales deben ser un 25% más fuerte que el cable (Muthukumar, 2003), bajo carga cíclica los cables tienen un límite elástico de 39.1 kips (174 kN) y un módulo inicial de elasticidad de 10.000 ksi (69.000 MPa). Cada cable tiene una resistencia máxima de 53 kips (235 kN), en la **Figura 15** se muestra la relación fuerza-deformación de un retenedor de cable típico (Muthukumar, 2003).

Figura 14
Conjunto típico de un retenedor



Nota. Fuente (Muthukumar, 2003).

Figura 15
Relación carga-deformación para retenedores

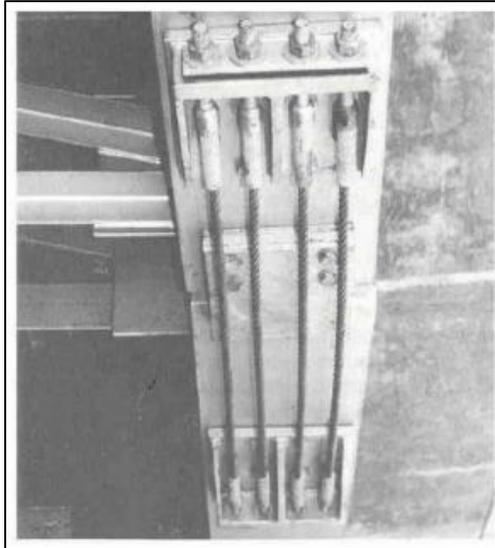


Nota. Fuente (Muthukumar, 2003).

Los retenedores se modelan en las juntas de los apoyos intermedios, utilizando un elemento de resorte bilineal con una holgura que resiste únicamente la fuerza de tracción. Se asume una relación de endurecimiento del 5% como se muestra en la **Figura 17**.

Figura 16

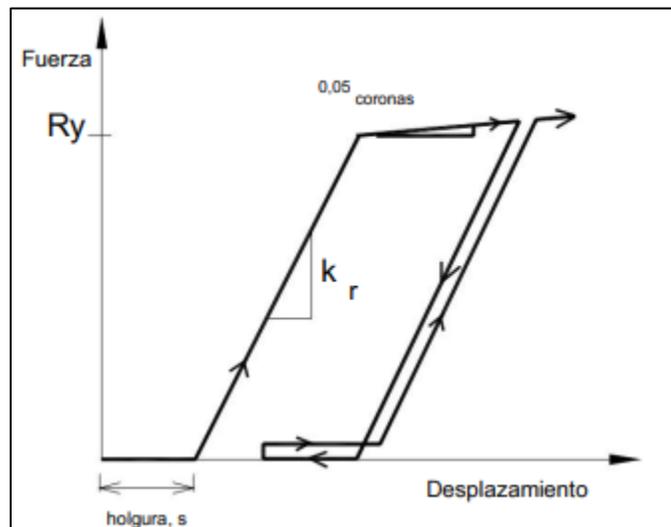
Conexión de retenedores entre tableros



Nota. Fuente (Muthukumar, 2003).

Figura 17

Modelo analítico para retenedores



Nota. Fuente (Muthukumar, 2003).

Para mejorar la eficiencia de los retenedores de acero, se han realizado investigaciones importantes como las respuestas sísmicas de estructuras de puentes rehabilitados con un cable de restricción durante el terremoto de Loma Prieta de 1989, donde se concluyó que los retenedores se ven afectados por factores como los contenidos de amplitud y frecuencia del movimiento del suelo, la interacción suelo-estructura, la flexibilidad de la subestructura y el análisis de la historia del tiempo no lineal que es necesario para un buen diseño. La eficiencia de los retenedores depende en gran medida de la relación que hay entre el periodo de las estructuras adyacentes, al adicionar retenedores a la estructura se aumenta el desplazamiento de marcos rígidos, el efecto de los retenedores en las respuestas de los pórticos se observó principalmente solo para pórticos muy desfasados, ósea, pórticos con una relación significativa de rigidez inferior a la unidad (Shrestha et al., 2017)

Los retenedores de acero mencionados anteriormente están diseñados para ser elásticos y no tienen una capacidad significativa de disipación de energía. Debido a esto, se requiere una gran cantidad de elementos de contención para limitar el movimiento de la junta a un rango aceptable, especialmente durante cargas sísmicas altas, según (Reginald DesRoches et al., 2000). Sin embargo, tener un número excesivo de restricciones en el sistema de contención puede generar fuerzas importantes en otros componentes del puente, como los cojinetes y las columnas.

Además, los cables y barras de sujeción utilizados en estos retenedores tienen una baja tensión de fluencia, del 1,75% y 0,2% respectivamente. Debido a la limitada capacidad de deformación elástica de estos materiales, se requiere una gran longitud de elementos de contención para limitar el movimiento de la junta en escenarios de terremotos extremos y cumplir con los requisitos de rendimiento elástico (Shrestha et al., 2017). Estas limitaciones de los retenedores de acero han impulsado la investigación en la búsqueda de alternativas adecuadas para reemplazarlos.

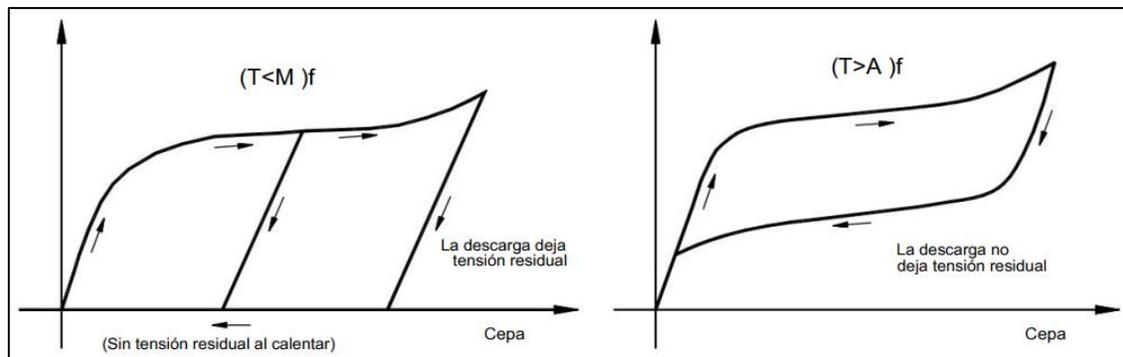
Otro mecanismo que se ha investigado con el fin de mejorar el rendimiento de las estructuras en ingeniería civil en las últimas décadas, llevando a cabo investigaciones importantes y aplicaciones de materiales inteligentes, es la aleación con memoria de forma (SMA), fluidos magnetorreológicos (MR) y fluidos electrorreológicos (ER). (Soong & Dargush, 1997). Entre estos materiales, el que ha mostrado tener gran potencial son los SMA, en aplicaciones de estructuras de

ingeniería civil debido a sus características únicas como: efecto de memoria de forma, efecto de super elasticidad y una capacidad de amortiguamiento relativamente alta. Aunque por años los investigadores han discutido la aplicación de este material para el control de vibraciones en estructuras de ingeniería civil, nunca se centraron en usarlo en puente (Dong et al., 2011).

Las SMA son una clase de material que puede restaurarse luego de sufrir grandes deformaciones mediante la aplicación de calor o eliminación de tensiones. Como resultado se obtienen varias características únicas, incluido el efecto de memoria de forma y la superelasticidad que los diferencian de otros metales y aleaciones. Este efecto fue reconocido por primera vez en 1932 al notar la reversibilidad de la transformación en oro-cadmio (AuCd) a través de observaciones metalográficas y cambios de resistividad (Ölander, 1932). Desde entonces se han descubierto alrededor de 30 aleaciones con efecto de memoria de forma.

Figura 18

Curvas tensión - deformación para SMA. (a) Efecto de memoria de forma; (b) Efecto de superelasticidad



Nota. Fuente (Dong et al., 2011).

La mayoría de las SMA existen en dos fases estables y distintas: austenita, la fase de alta temperatura y martensita, la fase de baja temperatura. Una transformación reversible entre estas fases es posible dependiendo de la temperatura y las condiciones de tensión. El efecto de memoria de forma de una aleación hace referencia a su capacidad para sufrir deformaciones reversibles entre estas dos fases. En su fase de baja temperatura [$T < M_f$ (temperatura de acabado de martensita)], los SMA presentan requisitos previos para el efecto de memoria de forma. En la forma de martensita

los SMA retienen parte de la deformación residual al descargarse, como se puede observar en la **Figura 18 (a)** (Dong et al., 2011).

En la forma de alta temperatura [$T > A_f$ (temperatura de acabado de austenita)], las SMA muestran el efecto de super elasticidad. En la fase austenítica, la martensita se forma al cargar más allá de cierto nivel de tensión, lo que da como resultado la meseta de tensión que se muestra en la **Figura 18 (b)**. Sin embargo, luego de la descarga, la martensita se vuelve inestables, dando como resultado una transformación de nuevo en austenita y recuperando su forma original sin deformar. Dado que el estado super elástico muestra un ciclo histerético con cero tensiones residuales, un dispositivo de absorción de energía fabricado con este material teóricamente proporciona un mecanismo de auto centrado, lo cual es prometedor en muchas aplicaciones diferentes (Dong et al., 2011).

Los SMA poseen aún más características que el efecto de memoria de forma y el efecto de superplasticidad, en la **Tabla 1** se muestran otras características que incluyen amortiguamiento histerético, capacidad confiable de disipación de energía, endurecimiento por deformaciones a deformaciones superiores al 6% y excelente resistencia a la corrosión. que los hacen atractivos para la mitigación de desastres en estructuras civiles (Dong et al., 2011).

Tabla 1

Comparación de las propiedades de las aleaciones con memoria de forma de NiTi con acero estructural típico

Propiedad	Aleación con memoria de forma de NiTi	Acero
Elongación recuperable	8%	0,2%
El módulo de Young	8,7E4 Mpa (austenita), 1,4-2,8E4 Mpa (martensita)	2:07 x 105 Mpa
Límite elástico	200-700 Mpa (austenita), 70-140 Mpa (martensita)	248-517 Mpa
Resistencia a la tracción	900 Mpa (totalmente recocido), 2000 Mpa (endurecido por trabajo) 25-	448-827 Mpa
Alargamiento al fallo	50% (totalmente recocido), 5-10% (endurecido por trabajo)	20%
Rendimiento frente a la corrosión	Excelente (similar al acero inoxidable)	Justo

Nota. Adaptado de (Dong et al., 2011).

Las características únicas de los SMA han hecho que se tengan varias aplicaciones en la ingeniería de puentes. Se ha examinado la aplicación de los SMA en la prevención del desplome de puentes, diseños de cojinetes de puentes innovadores, control de vibraciones de cables de puentes atirantados y diseños innovadores y rehabilitación de columnas y vigas de puentes (Dong et al., 2011). Los daños que han sufrido los puentes últimamente han resaltado el riesgo de desplome de las cubiertas de los puentes como resultado de los desplazamientos relativos excesivos de las bisagras durante sismos fuertes (Dong et al., 2011).

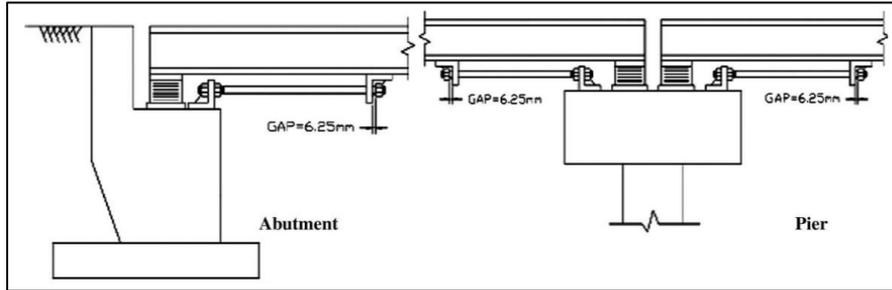
DesRoches & Fenves (2000) estudiaron el método de diseño y aprobaron la efectividad de los retenedores de cables de acero y las varillas de acero para mitigar el daño por desmontaje al limitar en las bisagras los desplazamientos relativos. Aún tienen limitaciones los retenedores de cable de acero tradicionales como por ejemplo un rango pequeño de elasticidad (0.2%) y una capacidad de ductilidad limitada (Andrawes & Desroches, 2005).

Para el control de desprendimientos de puentes, los SMA han demostrado tener un gran potencial gracias a su superplasticidad y gran capacidad de disipación de energía, por lo que en las últimas décadas se han llevado a cabo investigaciones intensas. Adachi & Unjoh (1999) propusieron un sistema inteligente de protección contra terremotos con función autorreparable para estructuras de puentes usando una placa de SMA de nitinol. Esto se realizó fijando un extremo de la placa a la mesa vibratoria y el otro extremo a otro elemento que simulaba el tablero del puente (Dong et al., 2011). Los resultados mostraron que este sistema de amortiguamiento con SMA redujo la respuesta sísmica de los puentes, lo que reduce el riesgo de colapso de los tramos del puente.

(Desroches & Delemont, 2002) llevaron a cabo un análisis no lineal para evaluar la eficacia de las barras de contención SMA en un puente de varios vanos simplemente apoyado. Utilizaron amortiguadores SMA para reducir los movimientos del puente en las bisagras intermedias y los pilares. Se realizó una prueba a escala real con una barra de contención SMA de nitinol de 25,4 mm de diámetro a temperatura ambiente (22°C) y una velocidad de deformación de 0,10 mm/s. Se comparó la respuesta del puente con las barras de contención SMA y los cables de contención de acero convencionales. Se concluyó que las barras de contención SMA fueron mucho más efectivas

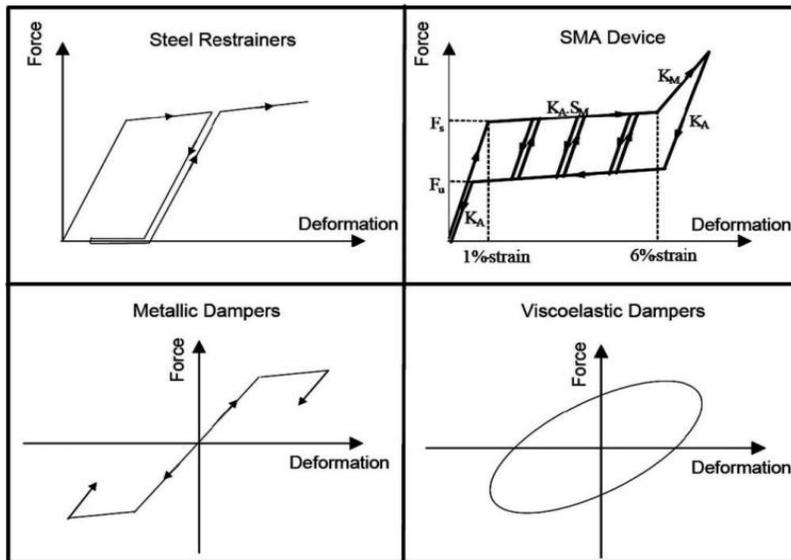
que los cables de acero para reducir los desplazamientos relativos de las bisagras en el pilar (Dong et al., 2011).

Figura 19
Configuración de barras de contención con SMA usadas en estribos y apoyos intermedios

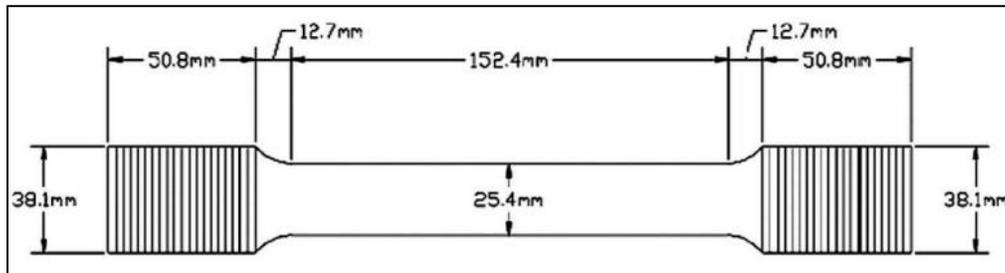


Nota. Fuente (Dong et al., 2011).

Figura 20
Relación típica fuerza-deformación de 4 esquemas de acomodamiento



Nota. Fuente (Dong et al., 2011).

Figura 21*Barra de sujeción de Nitinol SMA*

Nota. Fuente (Dong et al., 2011).

(Andrawes & Desroches (2005) investigaron el uso de retenedores de SMA como dispositivos para prevenir el colapso de puentes durante movimientos fuertes del suelo. Utilizando varillas SMA super elásticas en un puente de marcos múltiples, realizaron análisis dinámicos no lineales con 10 valores de movimiento del suelo similares a terremotos pasados en California. Los resultados demostraron que los retenedores de SMA ofrecieron una mayor resistencia y capacidad para evitar el colapso estructural en comparación con los retenedores de acero, los retenedores SMA redujeron significativamente los desplazamientos relativos en las juntas. Sin embargo, las derivas máximas del pórtico no se afectaron, esto significa que el uso de retenedores SMA no aumenta la demanda de ductilidad en los puentes (Dong et al., 2011).

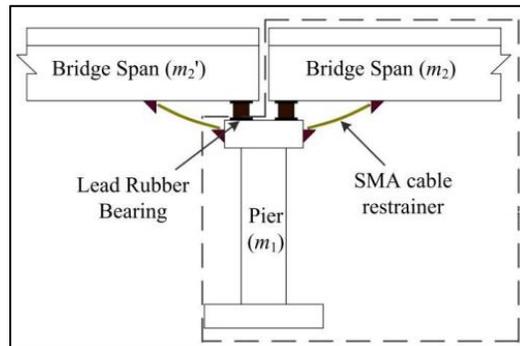
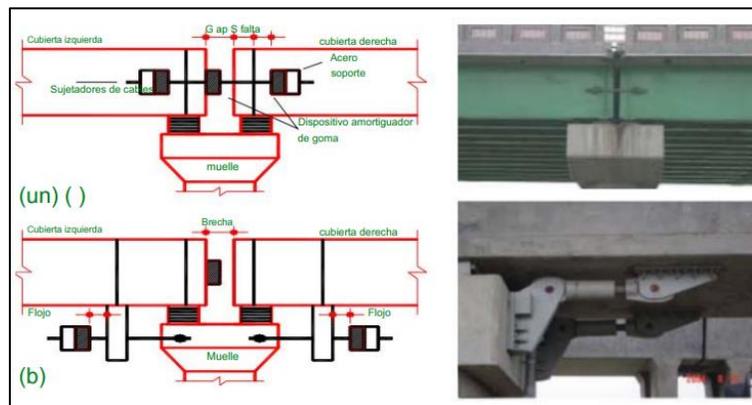
En las últimas décadas, se han usado varios dispositivos de aislamiento con el fin de mejorar el rendimiento de las estructuras. Los aisladores de base elastomérica mostraron ser efectivos para controlar la respuesta sísmica de las estructuras de los puentes. Un apoyo de aislamiento con alta flexibilidad puede cambiar el periodo fundamental de la estructura a un valor fuera del rango de frecuencia de un sismo (Rahman Bhuiyan & Alam, 2012), pero debido a que esto genera una flexibilidad alta en el apoyo, se presentan grandes desplazamientos en el tablero como en el sistema de aislamiento durante un sismo, generando problemas como la inestabilidad de los apoyos o desplazamientos de los vanos (Wang et al., 2019), ya que las juntas de expansión pueden ser un punto débil en un puente aislado, el desplazamientos relativo anticipado en una junta de expansión en un puente estándar durante un movimiento del suelo podría alcanzar muchas veces el espacio libre entre cubiertas (Raheem & Hayashikawa, 2008). Se han evaluado el desempeño de las estructuras de puentes que tienen registros de falla cercana en estudios previos (Li et al., 2017a,

2017b). Los resultados de dichos estudios mostraron que las estructuras que están en regiones de falla son altamente vulnerables. Por lo que es fundamental proteger los puentes de carretera aislados para evitar desplomes proporcionándoles dispositivos de restricción suplementarios. Con el fin de evitar que los tramos del puente se desplacen, se utilizan los retenedores. Los cables de acero y las barras de acero de alta resistencia se usan como sujetadores en los puentes. Debido a que son de bajo costo y de fácil instalación los sujetadores se han sugerido en varias guías sísmicas y también se proporcionan sus métodos de diseño (Wang et al., 2019).

Un ejemplo de esto se da en AASHTO (2012), la fuerza sísmica de los sujetadores se calculó como el coeficiente de aceleración, A_s , multiplicado por la carga permanente del más ligero de dos vanos contiguos. Aunque varios estudios se han centrado en desarrollar métodos de diseño para los sujetadores, la mayoría de estos se desarrollaron para puentes no aislados. Por lo tanto, se han propuesto para puentes aislados simplemente apoyados el diseño de arriostramientos de cables de acero, FRP y SMA (Li et al., 2018).

Los cables o barras de acero de contención tradicionales están diseñados para permanecer elásticos, es posible que por su escasa capacidad de disipación de energía transmitan mayores fuerzas a las pilas. Durante el terremoto de Loma Prieta de 1989 y el de Northridge de 1994, los investigadores observaron que varios puentes rehabilitados con estos sujetadores elásticos colapsaron (Andrawes et al., 2007). Los SMA con una capacidad superior de auto centrado y disipación de energía es un competidor ideal como retenedores para los retenedores convencionales (Wang et al., 2019). En investigaciones sobre el comportamiento sísmico de los sujetadores SMA, los resultados mostraron que dichos sujetadores pueden limitar efectivamente la deriva del tablero y al mismo tiempo disipar parcialmente la energía como amortiguadores pasivos complementarios, pero dichos estudios no proporcionaron un método de diseño adecuado para la utilización de estos sujetadores con SMA en puentes de carretera (Wang et al., 2019).

Los amortiguadores y/o retenedores entre las vigas adyacentes son una forma de superar los problemas de golpeteo en los puentes de carreteras (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 22*Puente aislado adaptado con sujetadores SMA**Nota.* Fuente (Wang et al., 2019).**Figura 23***Junta de expansión en puentes con dos configuraciones de retenedores con amortiguadores: a) a través de la junta, b) a través del apoyo**Nota.* Fuente (Abdel Raheem & Hayashikawa, 2008).

El SMA superclásico muestra un ciclo histéretico en forma de bandera cuando está sometido a una carga axial cíclica, proporcionando una disipación de energía adicional y de centrado. Con respecto a la recuperación total de la deformación axial, se puede obtener una recuperación total para deformaciones de hasta un 6% a un 8% y una recuperación parcial para niveles de deformación más alto (Desroches & Delemont, 2002). Para el uso como retenedores sísmico, el SMA es un material alternativo adecuado gracias a su gran deformación elástica, el amortiguamiento histéretico y el endurecimiento por deformación en grandes deformaciones (Shrestha et al., 2017).

Reconociendo el gran potencial de los SMA como retenedor sísmico, se han llevado a cabo muchas investigaciones significativas. La temperatura más baja en la aplicación de puentes se estable en -51°C , por lo que usar NiTi SMA como retenedor sísmico se limita por las bajas temperaturas, para esto los investigadores propusieron aleaciones de CuAlBe, ya pueden proporcionar propiedades de amortiguación y de centrado, su propiedad más notable es su amplio rango de temperatura de funcionamiento que va desde los -80°C a los 100°C , convirtiendo la CuAlBe en un dispositivo de retención adecuado para regiones frías. Otra deficiencia de los retenedores de NiTi SMA, es el costo elevado y la dificultad de mecanización, las cuales pueden reducirse al usar SMA basados en cobre, los cuales son más baratos y fáciles de mecanizar (Shrestha et al., 2017).

Respecto a los retenedores de polímero reforzado con fibra (FRP), estos cuentan con alta resistencia a la tracción y versatilidad de los FRP son las propiedades motivadoras a que se realice la exploración de estos materiales como un retenedor sísmico. Las ventajas de los FRP respecto a los retenedores de acero es la facilidad de fabricación e instalación.

La conexión de materiales compuestos reforzados con fibra de polímero a las superestructuras de los puentes se realiza mediante la aplicación de adhesivos en la plataforma del puente. Esta forma de conexión es no intrusiva y no requiere perforar el hormigón, a diferencia de la instalación de elementos de contención convencionales. Además, los elementos de contención convencionales suelen estar ocultos en el interior de la viga cajón del puente, lo que dificulta su inspección visual. En contraste, los elementos de contención de FRP son visibles, lo que facilita su inspección y evaluación (Shrestha et al., 2017).

Figura 24

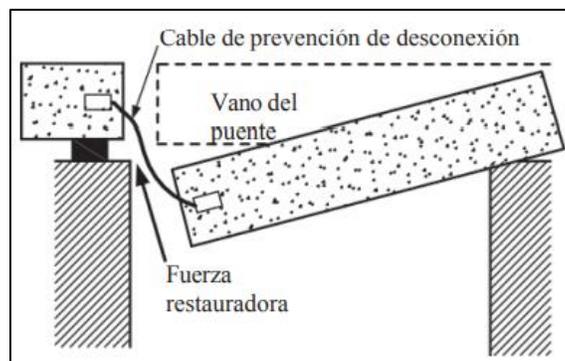
Colapso de vanos de puentes en el terremoto de Chi-Chi: a) puente Chang-gang, b) puente Shiwei



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

Figura 25

Función de los retenedores de cables para evitar el desprendimiento



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

3. Metodología

3.1. Tipos de elementos

Se han desarrollado muchos tipos de retenedores pasivos específicos para puentes, estos se dividen en tres categorías:

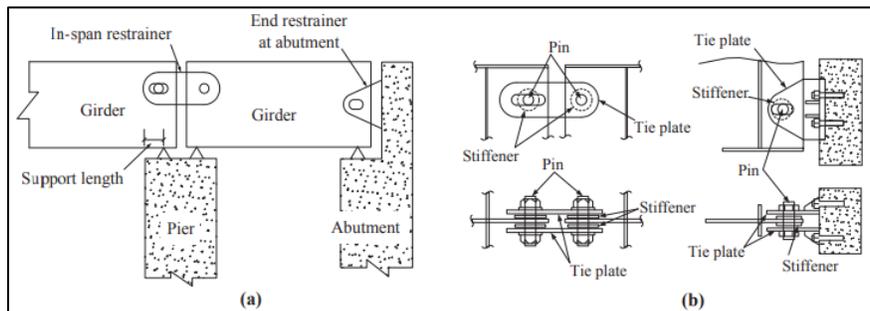
3.1.1. Retenedores basados en rigidez

Son aquellos que proporcionan una rigidez suficiente para que los puentes resistan los desplazamientos sísmicos.

3.1.1.1. Retenedores de acero con placa de anclaje

Figura 26

Retenedores de acero con placa de anclaje, a) En apoyos, b) Detalles de configuración



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

En Japón se introdujeron retenedores de acero con placa de anclaje para evitar el desprendimiento de puentes después del terremoto de Niigata de 1964. Investigaciones realizadas del comportamiento último de las placas de anclaje usadas como retenedores de puentes bajo cargas cuasi estáticas, concluyeron que una placa de anclaje de forma cuadrada es más eficiente que una placa redonda en términos de resistencia y deformaciones últimas. Ya que las cargas sísmicas son normalmente características de altas velocidades, en el análisis del comportamiento último de las placas a tracción de alta velocidad, se descubrió que los resultados de varios ensayos cuasiestáticos proporcionaban una estimación más conservadora del comportamiento dinámico último de las

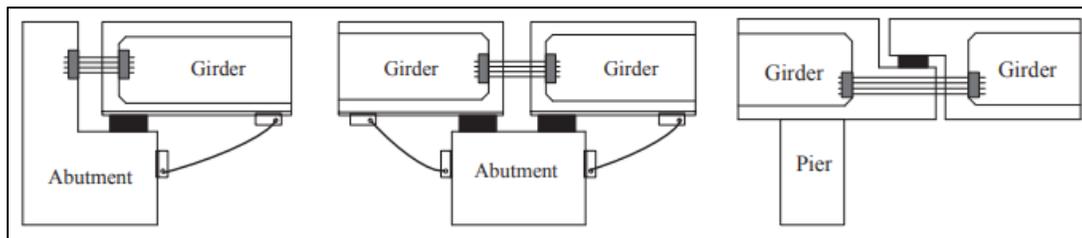
placas de anclaje, por lo que las placas de anclaje mostraron mayores capacidades últimas y mayor absorción de energía bajo cargas de alta velocidad, pero luego del terremoto de Kobe de 1995 se observó que estos sistemas de contención eran menos eficientes, ya que varios se dañaron ya que no tienen una alta capacidad de deformación (Xiang et al., 2019).

3.1.1.2. Cables de acero de alta resistencia o polímero reforzado con fibra de vidrio (FRP)

Son una opción deseable como retenedor de prevención de colapsos, los cables de contención se instalan normalmente en la dirección longitudinal de los puentes, puede ser en estribos y apoyos intermedios o en las juntas de los vanos (Xiang et al., 2019).

Figura 27

Aplicación de retenedores FRP en: a) Estribos, b) Apoyos intermedios, c) Ménsulas



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

La aplicación de los retenedores de acero se remonta al año 1971, cuando varios puentes colapsaron por la falta de asiento en el terremoto de San Fernando, California. Con esta aplicación se demostró la eficiencia para reducir la probabilidad de que se perdiera el asiento en los elementos del puente, desde entonces, los retenedores de cable se han estudiado ampliamente como retenedores para prevenir el desasentamiento de puentes (Xiang et al., 2019).

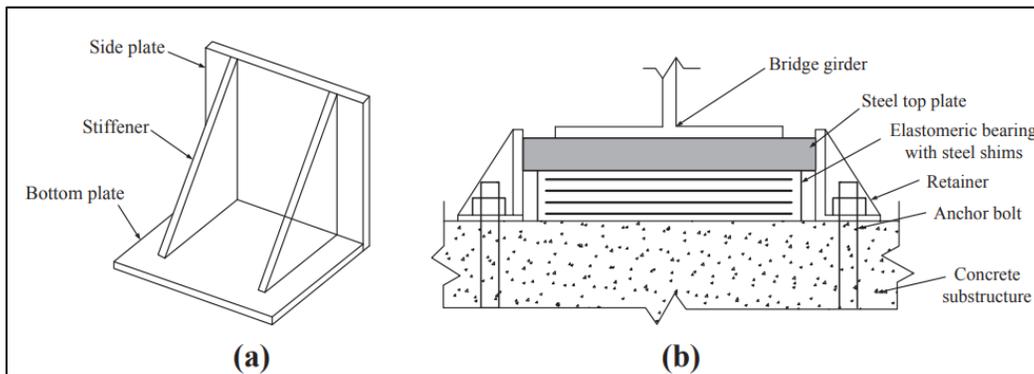
Ya que los FRP son versátiles y cuentan con una alta resistencia a la tracción, se convierten en un buen sustituto del acero para fabricar retenedores de cables (Shrestha et al., 2017).

3.1.1.3. Retenedores laterales rígidos

Son retenedores de acero laterales en forma de L, se ha investigado el comportamiento sísmico de estos elementos en puentes rectos ordinarios e inclinados equipados con apoyos elastoméricos. En los estudios realizados se llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales sobre retenedores laterales típicos en forma de L, los resultados facilitaron el desarrollo de un modelo de retenedor no lineal refinado, que podría contener los efectos del golpeo, la fluencia de la placa, así como la rotura del perno. El modelo realizado es muy adoptado para puentes con diseño de puentes aislados, apoyados en cojinetes elastoméricos.

Figura 28

Retenedores laterales rígidos típico en forma de L: a) Configuración básica, b) Adoptada como dispositivo de protección de rodamientos



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

3.1.2. Retenedores de disipación de energía

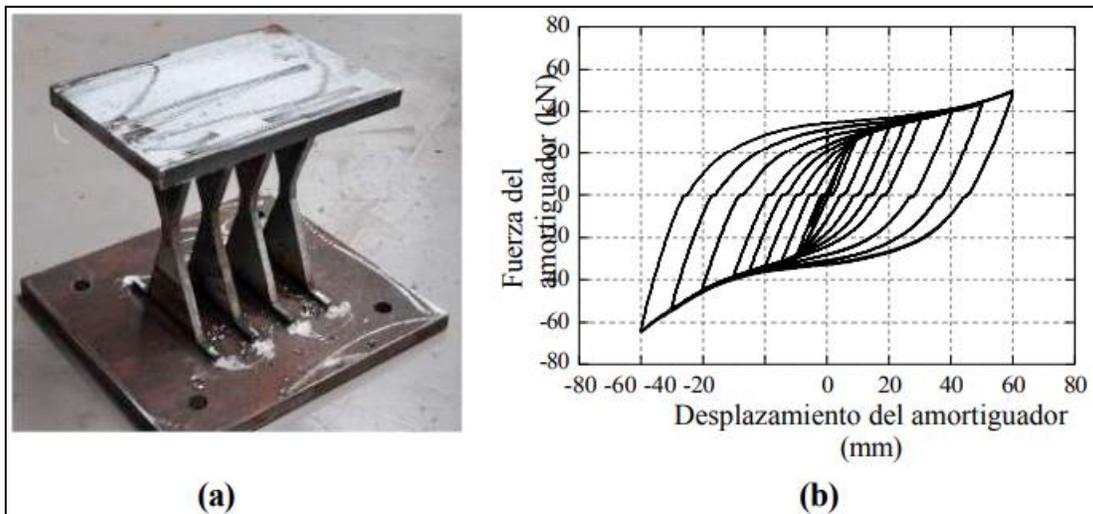
Dado que no se espera que los retenedores basados en rigidez disipen mucha energía sísmica, se desarrollaron e implementaron amortiguadores con capacidades sustanciales de disipación de energía en puentes, estos son:

3.1.2.1. Amortiguadores metálicos elásticos

El comportamiento de sacrificio de los amortiguadores metálicos les permite controlar la fuerza de inercia transmitida por la subestructura, protegiéndola de daños sísmicos graves. La histéresis de los amortiguadores metálicos también aumenta la capacidad de disipación de energía de los puentes para reducir el desplazamiento sísmico, estos amortiguadores metálicos tienen varias configuraciones o modelos, como son: varillas de acero rectas y cónicas, placa de acero en forma de U y E y tubos de acero. Tiene una relación fuerza-desplazamiento elastoplástico con un endurecimiento por deformación posterior a la cesión y un modelo bilineal simplificado es adecuado para captar su comportamiento sísmico (Xiang et al., 2019).

Figura 29

Amortiguadores metálicos en X: a) Configuración típica, b) Histéresis de ensayos cuasiestáticos



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

Dado que los amortiguadores metálicos suelen estar destinados para funcionar en una sola dirección de los puentes, el detallado en la dirección ortogonal es de preocupación en el diseño. Los amortiguadores metálicos deben ser detallados adecuadamente con el fin de garantizar que no se vea restringido o interrumpido el movimiento de la superestructura en la dirección ortogonal debido al anclaje de los amortiguadores (Xiang et al., 2019).

3.1.2.2. Amortiguadores viscosos de fluidos

Las características de dependencia de la velocidad de estos amortiguadores constituyen una importante forma de disipación de energía, que ha sido aplicado en varios puentes. Una alta velocidad por lo general induce una fuerza de amortiguación grande en los amortiguadores viscosos, esto los hace atractivos para la mitigación sísmica de estructuras contra los movimientos del terreno cercanos a fallas en donde los pulsos de alta velocidad son comunes. Se han realizado varios estudios sobre el uso de estos amortiguadores en puentes de grandes luces, como atirantado y colgantes. El puente Rion-Antirion es un ejemplo de un puente que cuenta con amortiguadores viscosos como retenedores de puentes y se encuentra en una región de zona sísmica muy activa (Xiang et al., 2019).

Figura 30
Puente Rion-Antirion



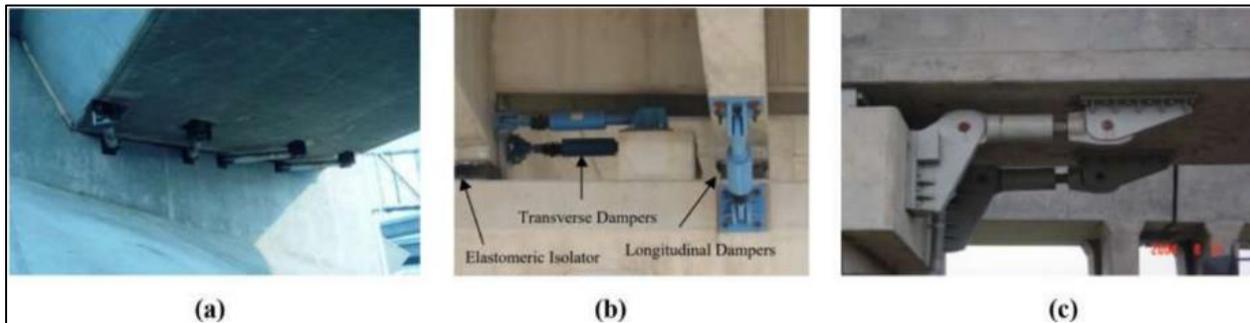
Nota. Fuente <https://structurae.net/fr/ouvrages/pont-de-riion-antirion>.

Los amortiguadores viscosos fueron implementados en el vano principal y los vanos de aproximación del puente para controlar los desplazamientos del tablero en relación con las pilas, estos también fueron ensayados con probetas a escala real para verificar el comportamiento sísmico extremo. Además de los puentes de grandes luces, los amortiguadores viscosos también son utilizados en puentes con pequeñas y medianas luces (Xiang et al., 2019).

Se evaluó la viabilidad de usar amortiguadores viscosos para mitigar la respuesta cercana a la falla de puentes de autopista, donde se obtuvieron resultados satisfactorios ya que mostraron que los amortiguadores eran eficientes para reducir casi todas las magnitudes de respuesta, incluyendo los desplazamientos relativos entre la superestructura y subestructura. (Xiang et al., 2019).

Figura 31

Ejemplos de aplicación de amortiguadores viscosos de fluidos



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

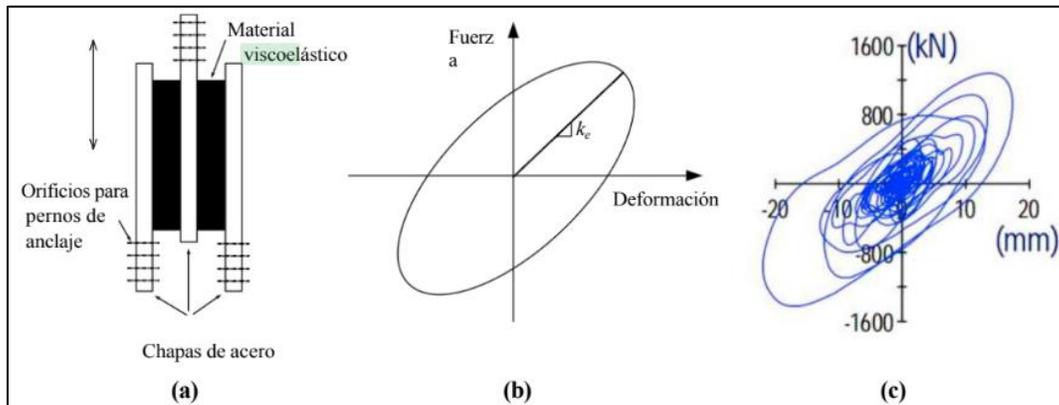
3.1.2.3. Amortiguadores viscoelásticos

Al igual que los amortiguadores viscosos de fluidos, los amortiguadores viscoelásticos también se usan como dispositivos de disipación de energía dependientes de la velocidad, son fabricados con copolímeros o sustancias elastoméricas que disipan energía mediante deformaciones por cizallamiento, se compone de varias capas de material viscoelástico separadas por placas de acero alternas como se muestra en la **Figura 32** (Xiang et al., 2019).

A pesar de que no es muy extendida la aplicación de los amortiguadores viscoelásticos en los puentes como en los edificios, en las últimas décadas se ha estudiado el uso de los amortiguadores viscoelásticos para evitar el asentamiento en los puentes. Se han realizado investigación sobre esto para la prevención del asentamiento en las juntas de expansión de puentes de autopista mediante simulaciones numéricas, demostrando que los amortiguadores viscoelásticos pueden reducir de manera eficaz los desplazamientos relativos entre elementos adyacentes sin demandas adicionales de ductilidad a la subestructura (Xiang et al., 2019).

Figura 32

Amortiguadores viscoelásticos: a) configuración típica, b) relación fuerza-desplazamiento, y c) curvas de respuesta histerética



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

Andrawes & DesRoches (2007) realizaron la comparación del comportamiento sísmico de los retenedores de SMA y otros dispositivos de contención en puentes (amortiguadores viscoelásticos, cables de acero y amortiguadores metálicos) del cual concluyeron que, para relaciones de periodo bajas entre elementos adyacentes, los amortiguadores viscoelásticos eran más eficientes que los amortiguadores SMA para limitar la apertura de las juntas, aunque esto implicara que se indujera una mayor fuerza de amortiguación.

3.1.3. Amortiguadores autocentrados

Con el avance del diseño sísmicos basado en el rendimiento, se vuelve cada vez más crítico el desplazamiento lateral de una estructura luego de un terremoto a la hora de realizar una rehabilitación. Cuando un puente es equipado con retenedores para prevenir la pérdida de asiento se desea que este regrese a su posición inicial después de un terremoto con poco desplazamiento permanente. Aunque este solo se puede conseguir usando coacciones elásticas como cables de acero de alta resistencia, puede que se induzca una fuerza sísmica considerablemente grande, imponiendo mucha demanda a la estructura. La mejor opción para minimizar los desplazamientos residuales del puente sin inducir una demanda de fuerza excesiva son los retenedores autocentrantes, los más comunes son las aleaciones superelásticas con memoria de forma SMA y los dispositivos híbridos, estos normalmente muestran una histéresis en forma de bandera. Cuando

estos son descargados la fuerza-distensión disminuye y durante la descarga, las curvas fuerza-desplazamiento de los retenedores auto entrantes vuelven a sus posiciones originales manteniendo cierta disipación de energía (Xiang et al., 2019).

3.1.3.1. Aleación con memoria de forma super elástica (SMA)

Los dispositivos basados en SMA están hecho de materiales de aleación únicos, estos tienen la capacidad de deformarse bastante y volver a su estado original tras la descarga o calentamiento. Estos dispositivos de SMA para aplicaciones estructurales, tienen diversas composiciones, como: NiTi, Cu-Al-Mn, Fe-Mn-Si, entre otros, de estos, los SMA con NiTi se han estudiado bastante, incluyendo las implementaciones como retenedores de prevención de colapso de puentes (Xiang et al., 2019).

Wilde et al. (2000) propusieron un sistema de aislamiento inteligente para puentes de autopistas, este consistía en usar un cojinete de caucho laminado y un SMA, donde el SMA controlaba el desplazamiento del cojinete de caucho y simultáneamente, aumentaba la capacidad de disipación de energía del sistema del puente. Desroches & Delemont (2002) realizaron experimentos con varillas de NiTi SMA a escala real aplicándolas en puentes simplemente apoyados de varios vanos como medida de rehabilitación sísmica, su estudio determino que las varillas de SMA eran más eficientes que los cables de acero convencionales para limitar los desplazamientos en las juntas de los puentes, incluso si estaban sometidos a terremotos cercanos a la falla (Xiang et al., 2019).

Choi et al. (2009) propusieron usar barras de flexión de SMA como retenedores de puentes con el fin de superar las limitaciones de los cables de SMA, los cuales no resistían compresiones, probando su comportamiento sísmico. Se determinó que las barras de flexión de SMA podían deformarse en flexión como en tracción, disipando una gran energía sísmica, lo que volvía a las barras de flexión un buen candidato como retenedores de prevención de des asentamiento de puentes. Se ensayó un modelo de puente de losa de hormigón de cuatro vanos, sometido a movimientos del terreno con amplitudes crecientes. Los resultados del ensayo indicaron que los

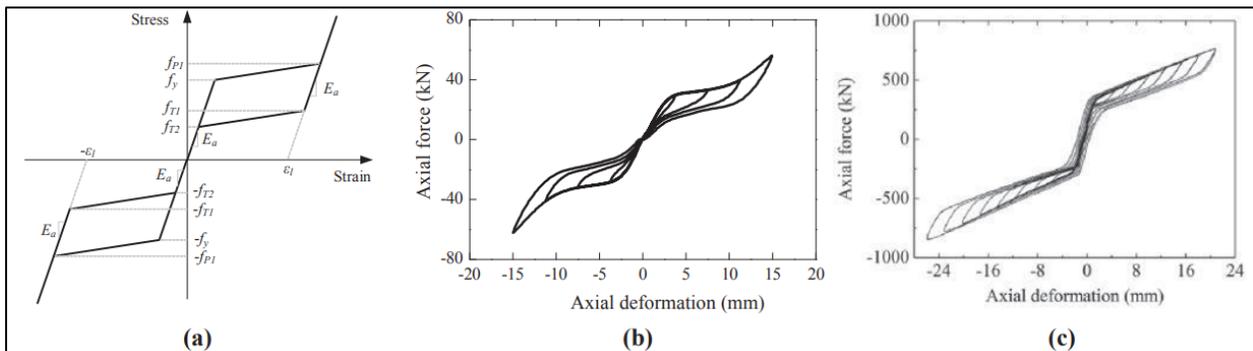
desplazamientos en las juntas como las derivas en las pilas se redujeron significativamente cuando se implementaron los retenedores SMA en los estribos del puente (Xiang et al., 2019).

3.1.3.2. Autocentrado híbrido

Además de los SMA, también se han diseñado, desarrollado y probado dispositivos autocentrantes híbridos, que también presentan la histéresis en forma de bandera. Por lo general este tipo de dispositivos tienen una configuración complicada y constan de varios componentes (Xiang et al., 2019). La mayoría de las implementaciones de dispositivos híbridos autocentrantes se encontraron en estructuras de edificios y rara vez en puentes. Se ha investigado la aplicación de una riostra autocentrantes para el reacomodamiento sísmico de puentes, las cuales fueron utilizadas como retenedores de prevención de asentamientos. Los resultados validaron la eficacia de la riostra autocentrantes para mitigar el colapso de vanos y aumentar el rendimiento de recentrado del puente.

Figura 33

Histéresis fuerza-desplazamiento en forma de bandera de dispositivos autocentrantes: a) modelo constitutivo analítico, b) histéresis experimental de los dispositivos basados en SMA y c) histéresis experimental de dispositivos autocentrantes híbridos



Nota. Fuente (Xiang et al., 2019).

3.2. Análisis de casos de estudio de cada artículo

3.2.1. Artículo 1: A new scheme for the seismic retrofit of multi-span simply supported bridges

Este artículo propone un nuevo esquema de rehabilitación de puentes, que incluye la rehabilitación de la losa del tablero existente, que se hace continua, y un sistema de contención exterior con retenedores de cables para reducir la carga sísmica del puente, basado en la reducción de la demanda de la estructura, para la modernización de los puentes con varios vanos con vigas simplemente apoyadas.

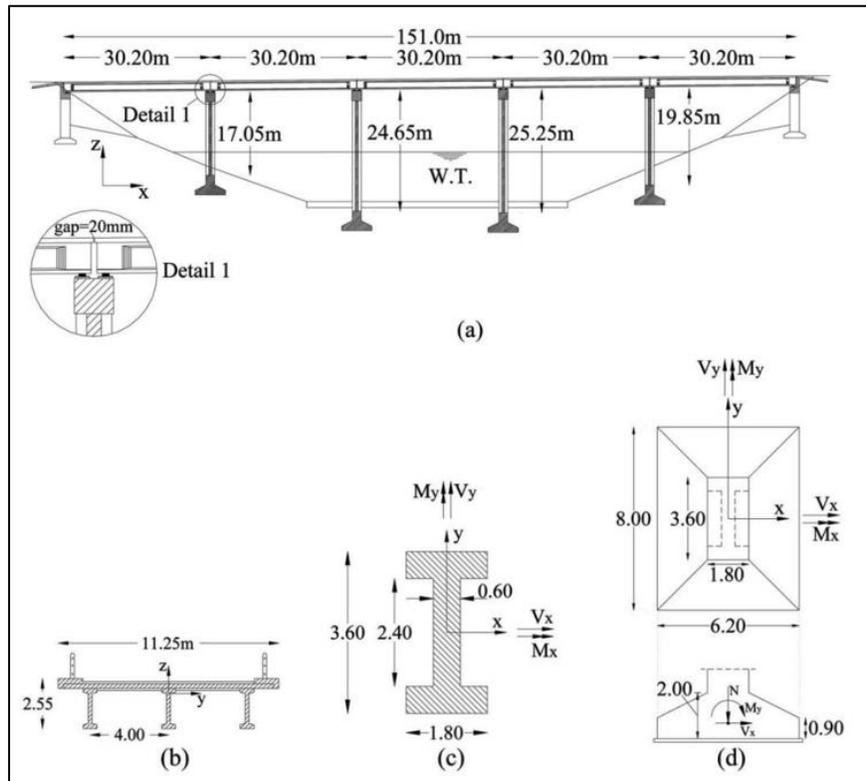
3.2.1.1. Sistemas de puentes analizados

3.2.1.1.1. Sistema de puente simplemente apoyado

Se analizó un puente existente y se compararon los resultados originales con el mismo puente rehabilitado en término de capacidad de servicio y resistencia sísmica por medio de un análisis de tiempo histórico dinámico no lineal, se realizó una investigación paramétrica ampliada.

El estudio se realizó con un puente de varios vanos con vigas simplemente apoyadas, algunas características y geometría del puente fueron:

- Puente recto con 5 vanos de 30,20m y una longitud total de 151m.
- Vanos separados por juntas de dilatación, con una holgura de 20mm.
- Un tablero de puente con ancho de 11,25m prefabricado y una parte colada in situ.
- Tres vigas en I prefabricadas y pretensadas por vano.
- Apoyos de sección transversal de 300mm y 500mm en dirección transversal y longitudinal respectivamente.
- Apoyo elastoméricos de 29mm de espesor.
- Tipo de suelo B.

Figura 34*Geometría puente analizado en el artículo 1*

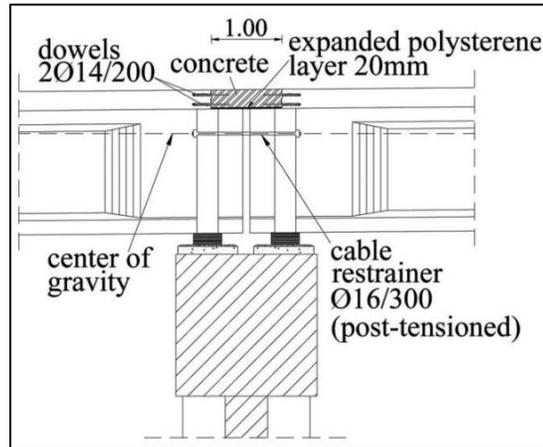
Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.1.2. Descripción de las medidas de acomodamiento

Se implementó un esquema que incluyó la continuidad de la losa de tablero del puente, las juntas de dilatación existentes se rellenaron con hormigón de alta resistencia, la conexión de los segmentos adyacentes se realizó con retenedores de cables longitudinales a fin de mejorar la resistencia a la tensión del material de relleno de conexión y el uso de sistemas de restricción externos en ambos extremos del puente. Se estudió la influencia de la abertura en la junta de dilatación en la respuesta sísmica del puente rehabilitado (Mitoulis et al., 2013).

Figura 35

Conexión de los segmentos adyacentes del puente con relleno de juntas y retenedores de cables externos



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.2. Diseño preliminar del esquema de acomodamiento

Adicionalmente se utilizó un sistema de contención externo, que constaba de una losa de contención que fue unida a la losa del estribo y pilotes de acero en forma de I hincados sobre el suelo de relleno a una profundidad de 7m con una separación entre pilotes de 1m.

La selección y diseño de las medidas de acomodamiento fueron basadas en los criterios de diseño mostrado en los códigos y practicas comunes como capacidad de servicio, resistencia a sismo, estética y rentabilidad. Tales criterios fueron:

- Respuesta elástica de los pilotes de acero IPE durante el puente en servicio.
- Los asentamientos del relleno.
- La carga de servicio del tablero continuo del puente debido a la interacción con el sistema de contención externo en servicio.
- Resistencia sísmica del sistema de contención,
- Estabilidad del pilar.
- Rentabilidad.

- **Conexión de las losas del tablero**

La conexión entre segmentos adyacentes presenta una influencia principal en la respuesta sísmica y la integridad estructural del puente después de un sismo. Esto se debe a que se consideró que se desarrollarían fuerza de colisión y movimientos excesivos de los segmentos que interactúan durante el sismo (Malhotra et al., 1995). Estas circunstancias pueden generar que se dé el colapso de los apoyos.

La conexión de las losas adyacentes se hizo continua rellenando las juntas intermedias con hormigón de alta resistencia, la selección del material para el relleno de conexión aseguró que se pudieran transmitir de manera confiable las fuerzas de compresión que resultaban de la expansión de los segmentos del puente durante un sismo, adicional a esto se mejora la resistencia a la tracción por medio de los retenedores de cables postensados que conectan los segmentos adyacentes sin ser atados directamente a los apoyos ya que estos apoyos no eran sísmicamente resistentes (Mitoulis et al., 2013).

- **Cuestiones críticas del diseño**

- La utilización de las medidas de acomodamiento condujo a una losa de cubierta continua la cual se separó de la pared posterior del pilar por medio de una junta de expansión.
- Los movimientos de la cubierta con el puente en servicio fueron acomodados por las juntas de expansión y por la flexibilidad controlable de los pilotes de acero.
- La junta de dilatación absorbió parte de la dilatación del tablero y la flexibilidad de los pilotes acomodó el resto de la dilatación del tablero cuando se cerró la junta de dilatación.
- Las juntas de dilatación se diseñaron con la menor holgura posible para aumentar la participación sísmica de contención.

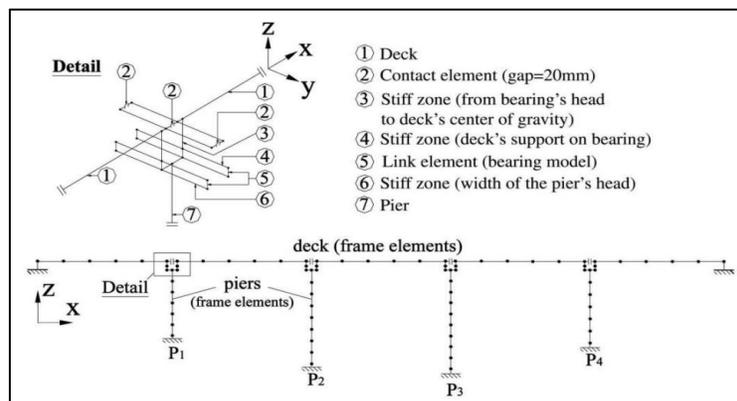
Los efectos de fluencia y contracción se ignoraron ya que estos se desarrollan en los primeros años del puente en servicio. Por lo que se supuso que las juntas de expansión estaban cerradas durante los trabajos de remodelación (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.3. Modelación del puente existente

- Se modeló el tablero de puente por elementos de pórticos que tenían las propiedades de la sección del tablero.
- El tablero discontinuo se apoyó en los estribos y en las pilas mediante cojinetes de caucho de bajo amortiguamiento.
- Los cojinetes se modelaron mediante aisladores de caucho que son elementos proporcionado por SAP2000, que corresponde a la rigidez traslacional y rotacional del rodamiento.
- La rigidez de los elementos de enlace se calculó de acuerdo con el modelo del apoyo de neopreno.
- Las posibles colisiones de segmentos adyacentes del puente durante un sismo se modelaron por elementos de impacto, que dieron cuenta de la apertura de las juntas de dilatación existentes. Estos elementos eran geoméricamente no lineales t solo recibieron compresión.
- La rigidez axial total de los elementos de impacto se colocó igual a la de la losa del tablero.
- El amortiguamiento que se dio por las colisiones entre segmentos fue modelado por un amortiguador viscoso equivalente.
- Los pilares fueron modelados por elementos de marco.

Figura 36

Modelado puente existente analizado en el artículo 1



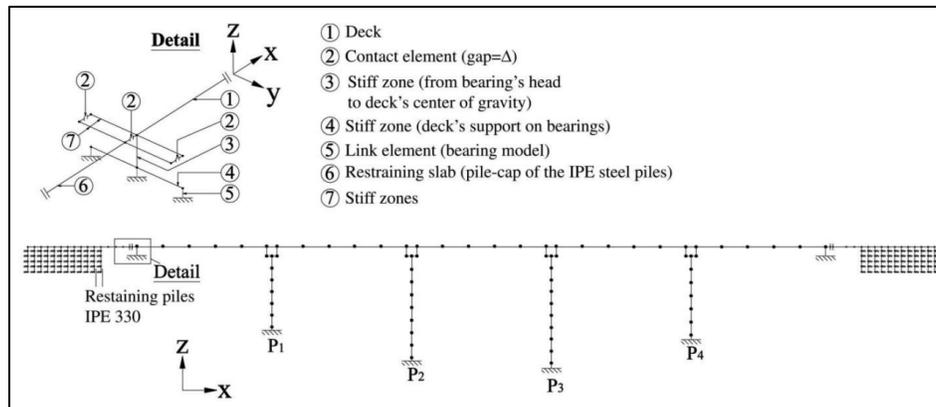
Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.4. Modelación del puente rehabilitado

- Se toma el modelo del puente existente, la losa cubierta continua y los sistemas de restricción externos.
- El sistema de contención consta de:
 - o La losa de contención que fue modelada por elementos de pórtico.
 - o Los pilotes de acero IPE.
 - o El suelo de relleno existente.
- Se adoptó la curva P-y bilineal del Instituto Americano del Petróleo (API) para el modelado de la resistencia del suelo de relleno lateral.

Figura 37

Modelado puente rehabilitado analizado en el artículo 1



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.5. Parámetros del estudio

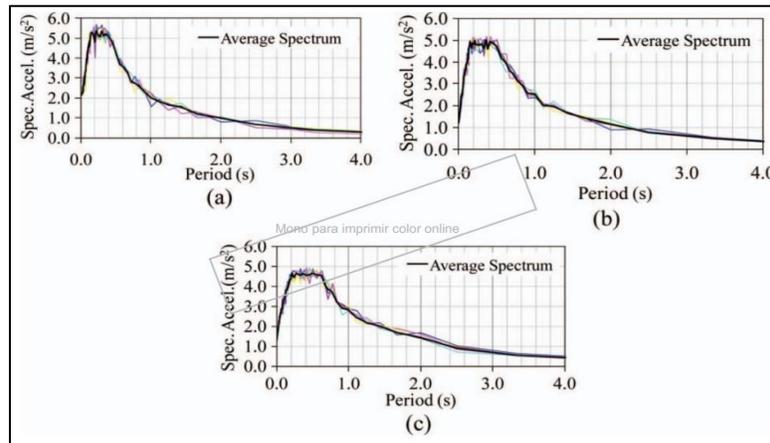
- El sistema de puente existente y rehabilitado se sometieron a acelerogramas artificiales, los cuales eran compatibles con los espectros elásticos EN 1991-1-5:2003 (2003) de tipo A, B y C dependientes del suelo.
- El análisis de historia del tiempo dinámico no lineal se realizó utilizando cinco acelerogramas artificiales, que se generaron con el código de computadora ASING (Sextos et al. 2003).

- Los espectros de respuesta correspondientes para los diferentes acelerogramas para cada tipo de suelo A, B o C se muestran más adelante.
- Los resultados del artículo corresponden a los valores máximos calculados para los cinco diferentes movimientos artificiales del suelo.
- Para cada tipo de suelo se conservó el mismo diseño del sistema de contención, ya que normalmente el material de relleno se deposita durante la construcción, por lo que este diseño no depende del tipo de suelo de la cimentación.
- Se consideraron dos aceleraciones máximas diferentes del suelo 0.16 y 0.24 g.
- Se eligió el amortiguamiento proporcional de masa y rigidez y se consideraron relaciones de amortiguamiento críticas iguales al 5% y 4 % para el primer y segundo periodo modal del puente analizado.

3.2.1.6. Evaluación del plan de recomodamiento sobre la base de los requisitos de servicio

- Las comprobaciones se refieren a:
 - o Adecuación en servicio de los pilotes IPE.
 - o Tablero del sistema de puente reacondicionado.
 - o Apoyos existentes.
- Durante el servicio del puente:
 - o La plataforma se expande y empuja los pilotes de contención hacia el suelo de relleno.
 - o El movimiento de restricción se estimó igual a 20 mm, considerando una dilatación uniforme total del tablero que corresponde a 25°C.
 - o Coeficiente de dilatación lineal igual a $1075 / 8C$.
- La deformación forzada de los pilotes IPE condujo a:
 - o Acción cortante máxima igual a 51,8 kN.
 - o Momento flector máximo de 44,6 kN*m.
- Se encontró que los pilotes de acero IPE 330 se mantienen elásticos para las acciones anteriores.

Figura 38
Espectros promedio para los tres tipos de suelo A, B y C



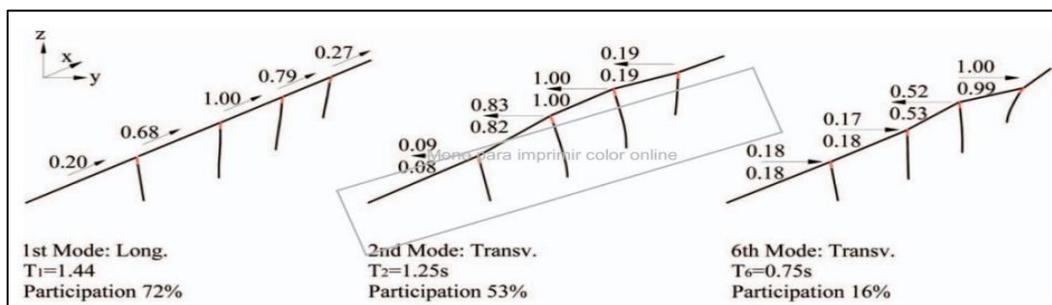
Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.7. Resultados

- **Comparación de la respuesta dinámica de los sistemas de ambos modelos**

La comparación de la respuesta dinámica de ambos modelos demostró que el esquema de reforzamiento modifica fuertemente las características dinámicas del puente. En la **Figura 39** se muestran tres formas modales importantes, sus periodos modales y los factores de participación del sistema de los puentes existente y rehabilitado. Los desplazamientos no corresponden a desplazamiento modales reales, esto debido a que fueron normalizados con respecto al máximo desplazamiento alcanzado en cada forma modal (Mitoulis et al., 2013).

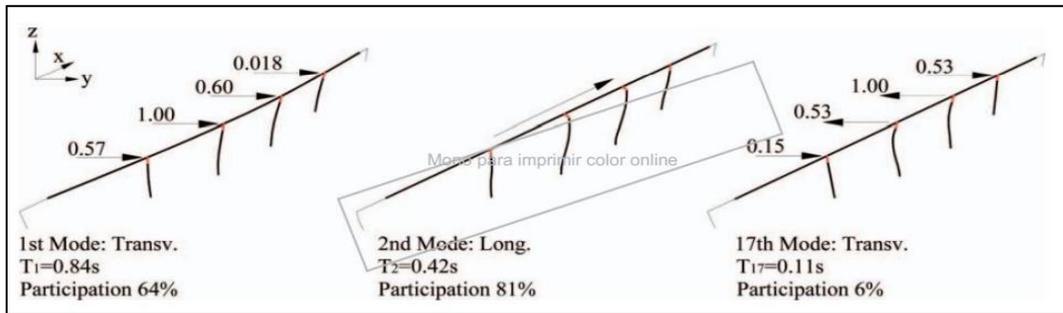
Figura 39
Formas modales y factores de participación de masa del sistema del puente existente



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

Figura 40

Formas modales y factores de participación de masa del sistema del puente existente



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

Las flechas hacia la izquierda representan el movimiento del segmento a la izquierda del apoyo, mientras que la flecha hacia la derecha representa el movimiento transversal del siguiente segmento.

La comparación de las formas modales y periodos, mostradas en las figuras anteriores, muestran que el sistema de refuerzo externo y la losa de tablero continuo aumentan significativamente la rigidez general del puente. Se encontró que el periodo de la primera forma de modo longitudinal se redujo hasta en un 71%, en el caso en que se consideraran los efectos de golpeteo. Sin considerar la participación del sistema de rehabilitación, el análisis modal presentaría un periodo del puente de 1.18 s, el cual correspondía a la condición sin golpeteo, transversalmente la influencia de las medidas de rehabilitación resultó menos significativa, reduciendo el periodo en un 33% (Mitoulis et al., 2013).

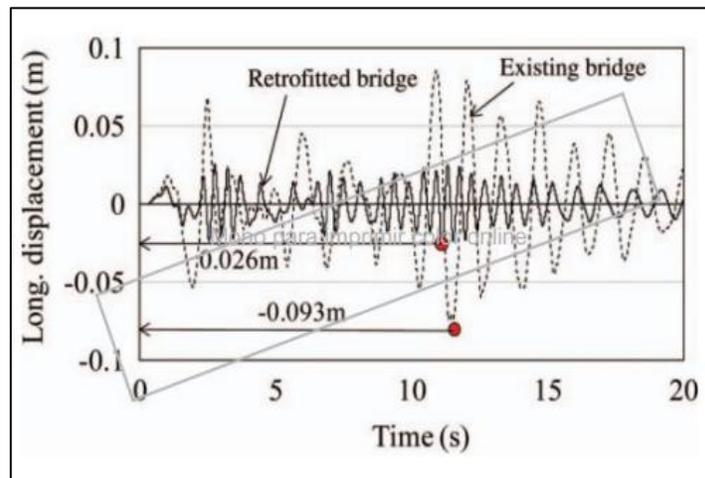
Los periodos modales del puente simplemente apoyado tanto longitudinales y transversales, son respectivamente, 16% y 6% menores si se tuvieran en cuenta la interacción entre los segmentos adyacentes del tablero utilizando elementos de resorte lineal con rigidez la mitad del tablero.

El estudio analítico muestra que la losa continua del tablero aumentó los factores de participación de los modos, pero no provocó reducciones significativas en los periodos modales del puente. Al contrario, cuando se usaron los retenedores de cables la continuidad de la losa se hizo significativa.

En la siguiente figura se muestra las historias temporales de los desplazamientos longitudinales del tablero para los dos sistemas de puentes analizados. En ella se muestra que el sistema de rehabilitación obtuvo menores desplazamientos longitudinales en comparación con los del puente existente, exactamente hasta un 72% (Mitoulis et al., 2013).

Figura 41

Historias temporales de los desplazamientos longitudinales de los tableros del puente existente y rehabilitado (tipo de suelo B, aceleración del suelo 0.16g)



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

● Evaluación de la eficacia sismorresistente de las medidas de rehabilitación

El efecto de contención del plan de rehabilitación principalmente se evaluó calculando los cambios porcentuales en los movimientos longitudinales y transversales del tablero. Se calculó el valor absoluto de la relación de reducción porcentual, PR (%), en los movimientos de acuerdo a la ecuación 1.

Ecuación 1

Determinación de la reducción porcentual PR

$$P.R.(\%) = \left(1 - \left| \frac{u_{E,RT}}{u_{E,EX}} \right| \right) \times 100$$

Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

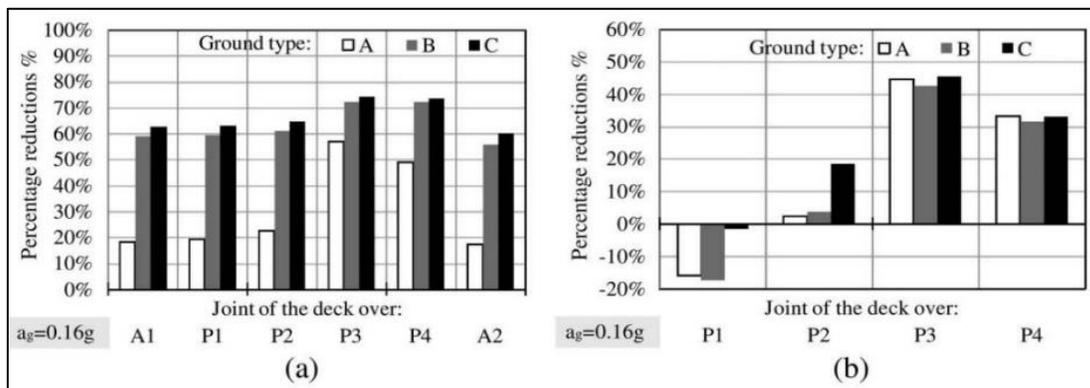
Donde: (UE), (RT) y (UE), (EX) son los desplazamientos sísmicos del tablero del puente rehabilitado y existente, respectivamente.

Estos desplazamientos fueron determinados para las juntas sobre los apoyos adyacentes del tablero, los estribos y los apoyos. Si PR era positivo, entonces los desplazamientos del puente rehabilitado eran menores que los desplazamientos del puente existente, ósea, que los desplazamientos se reducían.

La **Figura 42 (a)** muestra la variación del factor PR en caso de adoptarse la sismicidad menos que fue de 0.16g y la **Figura 42 (b)** muestra que las medidas de rehabilitación propuestas redujeron los desplazamientos longitudinales de la cubierta en una 18% a 74%.

Figura 42

Factores PR. (a) en los movimientos longitudinales y (b) en los transversales del tablero del sistema de puente rehabilitado para los 3 tipos de suelo considerados (aceleración del suelo: 0.16g)



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

La menor reducción correspondió para un suelo tipo A mientras que la mayor se dio para un suelo tipo C, esta reducción de los desplazamientos longitudinales se consideró un beneficio importante del sistema de rehabilitación.

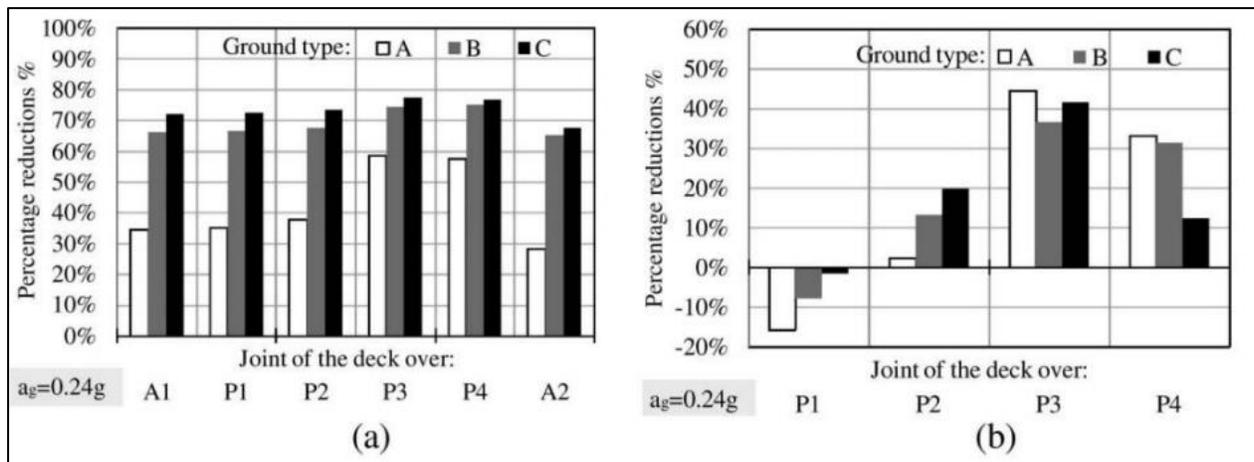
En puentes de varios vanos con vigas simplemente apoyadas, la consideración en el diseño típica es evitar el desplazamiento longitudinal en sus vanos, esto se vuelve más crítico en caso de que el tablero responda a grandes desplazamientos. Los desplazamientos del tablero se

restringieron de manera más efectiva sobre los apoyos intermedios P3 y P4, no hubo mucha influencia en el apoyo P2 ya que transversalmente los desplazamientos solo se redujeron 19%.

En la **Figura 43** muestra la variación del factor PR para la sismicidad mayor de 0.24g, donde se puede observar que los desplazamientos longitudinales del tablero del puente se redujeron entre un 28% y 78%. El efecto del sistema externo pareció incrementarse en comparación con el correspondiente en la sismicidad menor de 0.16g, esto se le atribuye a que el puente respondió con mayores desplazamientos cuando se incrementó la aceleración del terreno.

Figura 43

Factores PR. (a) en los movimientos longitudinales y (b) en los transversales del tablero del sistema de puente rehabilitado para los 3 tipos de suelo considerados (aceleración del suelo: 0.24g)



Nota. Fuente (Mitoulis et al., 2013).

Se encontró que los desplazamientos longitudinales del tablero del puente rehabilitado se restringían de mejor manera cuando el tipo de suelo era más blando, es decir, tipo C en lugar de tipo A. Esto quiere decir que el puente rehabilitado era más eficaz en puente que se cimentaban sobre suelo más blandos, aunque este no coincide con lo hallado para la dirección transversal. Los resultados mostraron que el tipo de terreno no tuvo influencia predecible en la eficiencia del sistema en el sentido transversal (Mitoulis et al., 2013).

3.2.1.8. Conclusiones del estudio

- Se investigó un nuevo esquema de rehabilitación sísmica de puentes simplemente apoyados, este esquema introdujo la rehabilitación de la losa del tablero, la cual se hizo continua en sus apoyos, se colocó retenedor de cable en sus apoyos y se utilizó un sistema externo con pilotes IPE hincados.
- Los requisitos de capacidad de servicio del puente rehabilitado se pueden acomodar mediante la provisión de juntas de expansión y la flexibilidad controlable del sistema de restricción. Las variaciones de servicio mostraron que tanto el tablero del puente existente como los pilotes de contención recibieron de manera segura la carga en servicio, la cual se desarrolló debido a la expansión del tablero.
- Según el estudio de respuesta dinámica de puentes rehabilitados, el sistema de contención externa con losa de tablero continua aumenta la rigidez general del sistema sismorresistente del puente. Por lo tanto, se encontró que el tiempo de forma del primer modo longitudinal disminuyó en un 71%, mientras que el tiempo de forma del primer modo transversal disminuyó en un 33%.
- El esquema de contención utilizado tuvo efectos significativos en los desplazamientos sísmicos del puente. La comparación de los desplazamientos longitudinales del puente existente con los del rehabilitado mostraron que los desplazamientos del puente rehabilitado se redujeron entre un 18% y un 78% y aunque en menor medida, también contribuyó a los desplazamientos transversales que se redujeron hasta un 46%.
- En cuanto a la influencia de la apertura de las juntas de dilatación de los extremos, se mostró que mientras más ancha se la junta, menor será la eficiencia del sistema de contención, por lo que en el sistema actualizado se minimizó en lo posible la holgura en las juntas de dilatación.

3.2.2. Artículo 2: Innovative control strategy for seismic pounding mitigation of bridge structures.

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo analítico de juntas de expansión, el cual tiene en cuenta la interacción entre los segmentos adyacentes del tablero del puente y el efecto del impacto y las restricciones para el análisis de la historia del tiempo no lineal.

3.2.2.1. Formulación del modelo de elementos finitos no lineales

Se aborda el enfoque utilizado para desarrollar un modelo analítico que representa de manera precisa y detallada la respuesta estructural de un puente ante cargas y condiciones no lineales. Este enfoque se basa en el método de elementos finitos, que es una técnica numérica ampliamente utilizada en el análisis de estructuras. El análisis del modelo de puente se realiza utilizando un método analítico basado en el análisis de respuesta dinámica de desplazamiento finito elastoplástico. Esto implica que se tienen en cuenta tanto las no linealidades geométricas como las no linealidades materiales en el comportamiento del puente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Las no linealidades geométricas se refieren a los cambios en la forma y la geometría de la estructura debido a las deformaciones producidas por las cargas aplicadas. Estas deformaciones pueden ser significativas en estructuras sometidas a grandes desplazamientos o deformaciones, lo que requiere considerar la no linealidad geométrica en el modelo analítico. Por otro lado, las no linealidades materiales se refieren a los cambios en las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción del puente, como el acero y el hormigón, a medida que se someten a cargas. Estos cambios pueden incluir comportamientos elásticos no lineales, plasticidad y endurecimiento por deformación. Para tener en cuenta estas no linealidades materiales, se utiliza una relación bilineal elástica-plástica tensión-deformación en el modelo de elementos finitos (Mitoulis et al., 2013). El análisis de desplazamiento finito elastoplástico se formula utilizando las ecuaciones de equilibrio incremental total. Estas ecuaciones permiten determinar la matriz de rigidez tangente y los vectores de fuerza de punto nodal, teniendo en cuenta las no linealidades geométricas y materiales. Además, se considera el estado inicial de los efectos de las tensiones residuales tanto en la rigidez tangente como en el vector de fuerza (Raheem & Hayashikawa, 2008).

En el modelo de elementos finitos, se utiliza el concepto de "fibra" para representar la interacción entre la fuerza de flexión y el eje del puente. Este enfoque permite considerar automáticamente la interacción entre estos dos componentes y su influencia en la respuesta estructural (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Es importante destacar que el modelo de elementos finitos no lineales tiene en cuenta la respuesta dinámica del puente, lo que implica que se consideran las vibraciones y movimientos del puente bajo cargas dinámicas, como las producidas por el viento o los terremotos. Esto permite obtener una representación más realista y precisa del comportamiento estructural del puente en condiciones reales (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Además, el modelo de elementos finitos no lineales también tiene en cuenta los efectos de las tensiones residuales en la rigidez tangente y el vector de fuerza. Las tensiones residuales son tensiones internas que quedan en la estructura después de su fabricación, como las tensiones generadas durante el proceso de soldadura. Estas tensiones residuales pueden afectar la respuesta estructural del puente y, por lo tanto, se consideran en el análisis (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.2. Modelo analítico de la estructura del puente objetivo

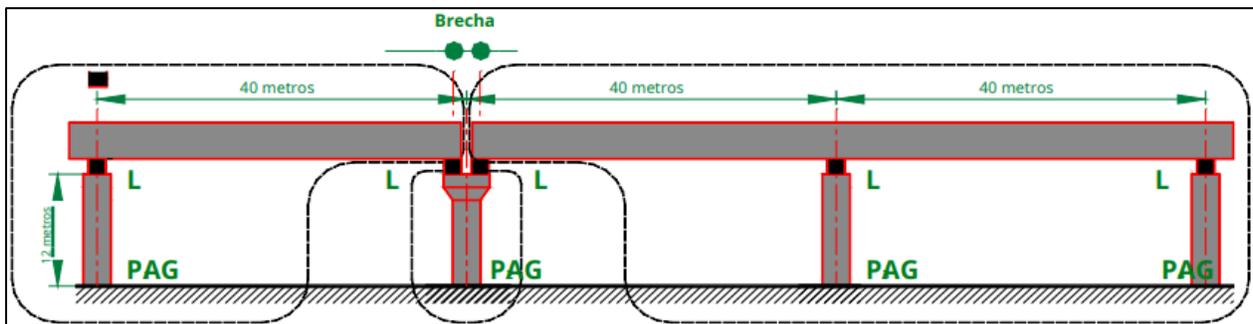
3.2.2.2.1. Modelo del puente

En este estudio se analizó un puente de carretera típico de 3 tramos y 2 segmentos adyacentes como se muestra en la **Figura 44**. La superestructura está formada por vigas de placa de acero con 40m de luz y 12 m de ancho, pilares de acero de 12 m de altura y tiene un peso total de los 3 vanos es 20.2 MN. Se definió un modelo analítico que permitiera representar la respuesta estructural global. Siendo elaborado como un modelo de elementos finitos no lineal bidimensional, realizando el análisis de la respuesta dinámica en la dirección longitudinal del puente, además se consideraron cojinetes de caucho de plomo (LRB) ya que el aislamiento de la base con estos reduce pasivamente las respuestas sísmicas del puente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Se determino el periodo fundamental del sistema del segmento izquierdo y derecho con base en un análisis de valores propios usando un modelo bidimensional de elementos finitos, en función con la rigidez relativa de los cojinetes LRB y su relación de periodo. También se consideró que las distintas configuraciones de retenedores de cable, limitan el desplazamiento relativo, como se muestra en la **Figura 45**, los retenedores se usaron solo en tensión, con un espacio térmico proporcionado para controlar el acoplamiento de los retenedores durante los ciclos térmicos.

Figura 44

Modelo base de puente aislado con rodamiento LRB



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.2. Modelo analítico de junta de expansión

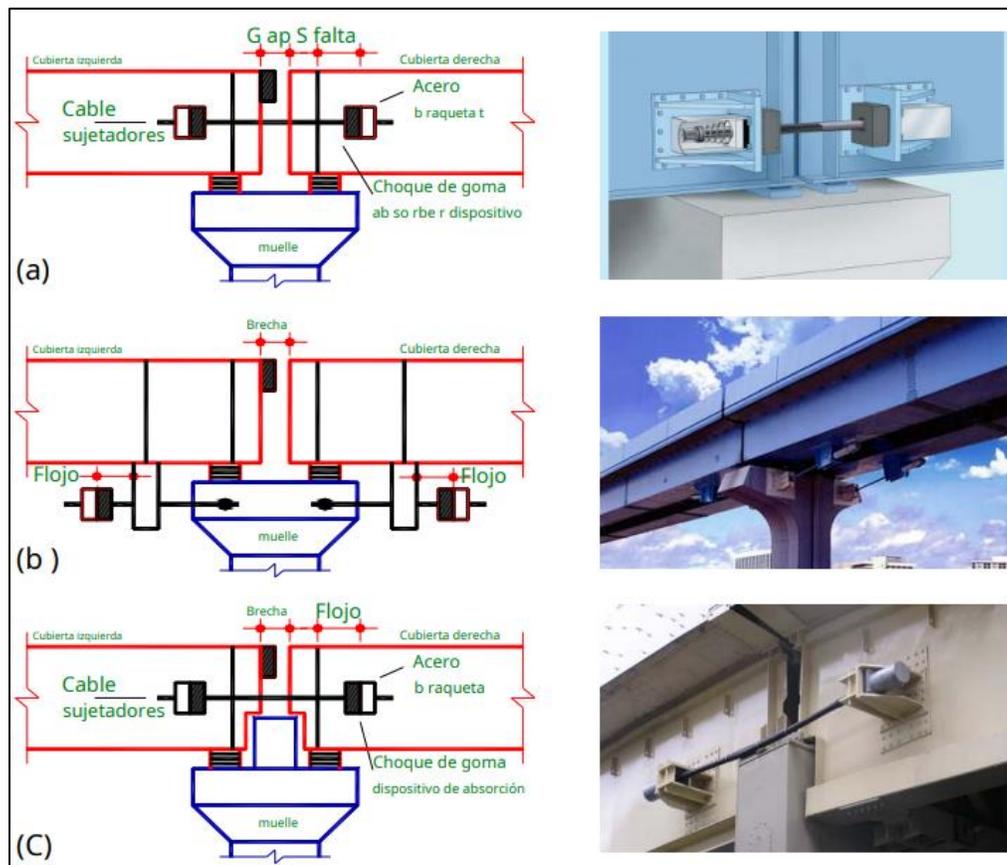
La respuesta sísmica de las estructuras de puentes se ve fuertemente influenciada por las características de las juntas de expansión, por lo que es crucial modelarlas correctamente. La presencia de una brecha en la junta introduce no linealidades en el análisis sísmico de la estructura. Para abordar los problemas asociados con los impactos en los puentes de carreteras, una solución popular es utilizar amortiguadores y/o limitadores entre las vigas adyacentes. Estos elementos absorben la energía del impacto y reducen los efectos de los golpes, como se muestra en la **Figura 45**. Los retenedores también se utilizan para evitar el desplazamiento de las vigas y pueden contribuir a reducir los efectos de los impactos. En la **Figura 45** se muestra un esquema de la junta de expansión del puente con varias configuraciones de restricción (Raheem & Hayashikawa, 2008).

En el desarrollo de las juntas de dilatación, se ha tenido en cuenta tanto el efecto de los golpes como las contenciones. Para ello, se estableció una vinculación entre los nodos externos de

los segmentos adyacentes utilizando elementos de separación no lineales, con el fin de modelar las fuerzas de impacto resultantes de una posible colisión. Las características de fuerza-deflexión de estos elementos se muestran en la **Figura 46**. Estos elementos de separación no lineales permiten simular de manera más precisa el comportamiento de las juntas de dilatación frente a fuerzas de impacto, proporcionando información valiosa para el análisis de la respuesta sísmica de la estructura del puente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 45

Esquemas de la junta de expansión del puente con 3 configuraciones de retenedores: a) a través de la bisagra, b) a través del pilar y c) a través de la bisagra con llave de corte



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.2.3. Modelo analítico de junta de expansión

Después del terremoto de Hyogo-ken Nanbu en 1995, que causó graves daños en los puentes, se implementaron medidas más estrictas en la especificación japonesa de diseño de puentes. Se estableció un nivel más alto de movimiento del suelo (diseño de nivel II) en comparación con los terremotos más frecuentes (diseño de nivel I) para los cuales se diseñaron las estructuras antiguas. Los terremotos de nivel II se dividen en dos tipos: Tipo I (inter-placa) y Tipo II (intra-placa). Para el análisis, se consideran tres movimientos sísmicos representativos del terremoto de Kobe de 1995, recomendados como movimientos sísmicos estándar de nivel II por la Asociación de Carreteras de Japón, específicamente para suelos moderados. Los espectros de respuesta para un amortiguamiento de 0.05 se muestran en la **Figura 47** (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.3. Resultados numéricos discusión

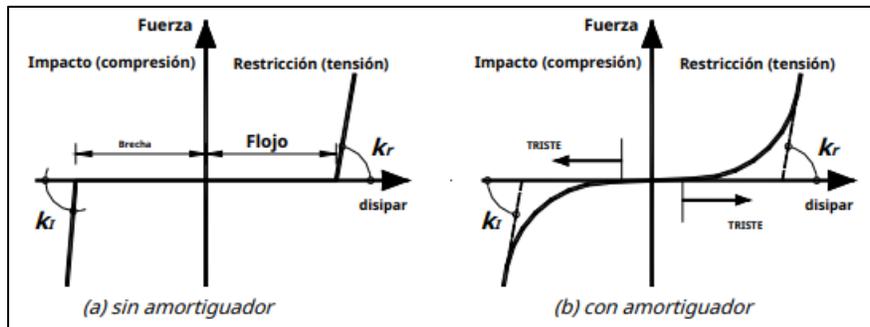
Se utiliza un modelo de puente de carretera aislado de base, basado en el Manual para el diseño de puentes de carretera de Menshin, para analizar los efectos de los golpes sísmicos en la respuesta estructural. Se desarrollan modelos de elementos finitos para estudiar los golpes sísmicos no lineales y se analiza la influencia de diferentes parámetros en la respuesta del puente a los golpes. Se consideran dos estructuras de puente adyacentes con relaciones de frecuencia fundamental de 0.74 (Modelo I) y 0.52 (Modelo II). La frecuencia fundamental del marco del puente izquierdo se mantiene constante, mientras que la del marco del puente derecho se varía para dos frecuencias diferentes. Los cojinetes de caucho de plomo (LRB) se modelan con elementos bilineales que consideran su endurecimiento por deformación. Se utiliza un elemento de impacto para simular el golpeteo entre las cubiertas del puente. Los limitadores se modelan como resortes de solo tensión con holgura. Para investigar la interacción entre los segmentos adyacentes del puente, se utilizan diferentes tamaños de espacio de separación. Se estudia el efecto del tamaño del espacio en la respuesta del puente, utilizando un espacio de separación crítico seleccionado. Se analiza también el efecto de la configuración de los limitadores y los efectos de los amortiguadores (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Se investigan cinco casos diferentes para determinar los efectos de estos parámetros en la respuesta del puente.

- Caso I: El caso de referencia de la respuesta del modelo de puente sin golpes.
- Caso II: El modelo de puente con golpes.
- Caso III: El modelo de puente con martillazos y contenciones mediante bisagra (Configuración I)
- Caso IV: El modelo de puente con golpes y amarres a través de la pila (Configuración II).
- Caso V: El modelo de puente con martillazos y amarres mediante bisagra con llave cortante (Configuración III).

Figura 46

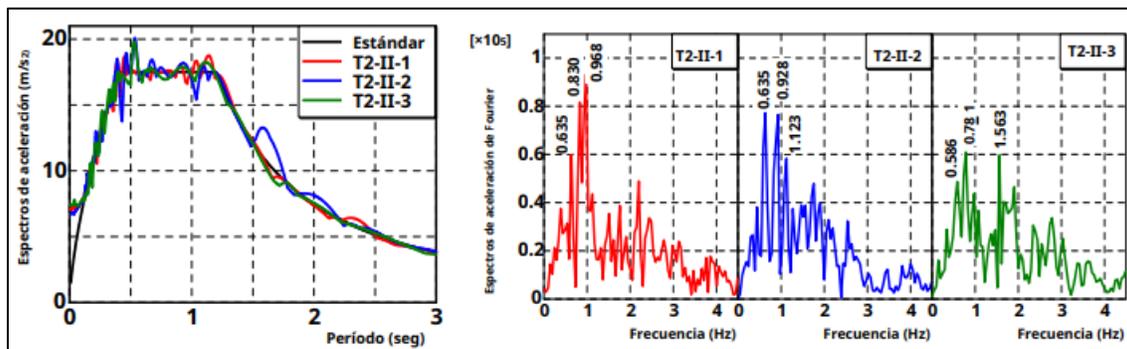
Modelos de golpeteo, retenedores y dispositivos amortiguadores



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 47

Espectro de respuesta de aceleración de los movimientos sísmicos



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

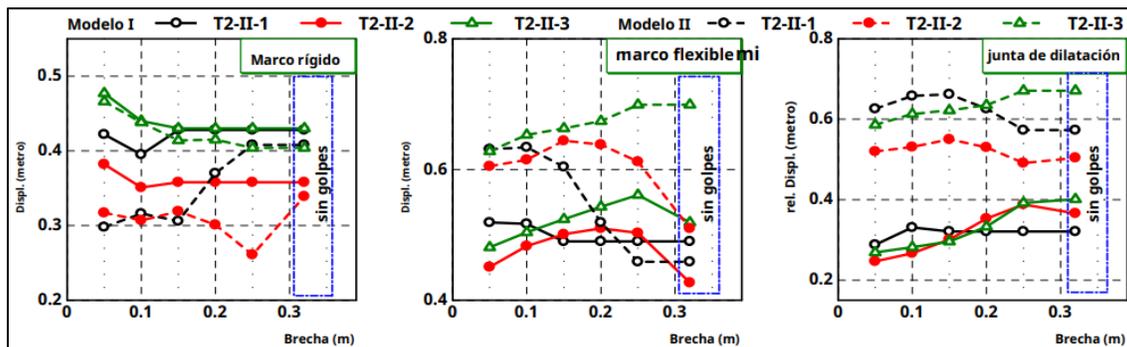
3.2.2.3.1. Efectos de golpes entre cubiertas adyacentes

En el estudio realizado, se analizó el efecto del desplazamiento relativo en la junta de dilatación y los segmentos del puente adyacentes en la respuesta estructural. Se encontró que el golpeteo reduce el desplazamiento de un segmento cuando vibra cerca del período característico del movimiento del suelo, mientras que aumenta el desplazamiento en el segmento adyacente (Raheem & Hayashikawa, 2008). Además, se observó que el desplazamiento relativo en la junta de dilatación es más pronunciado en el modelo II, que tiene segmentos de marco altamente desfasados. Esto significa que el movimiento de los segmentos flexibles del puente tiene un impacto significativo en el desplazamiento relativo de la junta de dilatación (Raheem & Hayashikawa, 2008). El estudio también presentó las historias de tiempo de desplazamiento del segmento de superestructura para diferentes tamaños de abertura de la junta. Se encontró que el golpeteo puede alterar significativamente el comportamiento de la estructura dependiendo del tamaño del espacio, la relación de frecuencia y las características de la onda sísmica de entrada (Raheem & Hayashikawa, 2008).

El golpeteo sísmico puede generar pulsos de aceleración de alta magnitud y corta duración, lo cual puede causar daños estructurales. La fuerza de impacto y la amplificación de la respuesta de aceleración dependen de la relación entre el tamaño del espacio y el desplazamiento relativo, así como de la relación de frecuencia entre la frecuencia fundamental del segmento del marco y la del movimiento del suelo (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 48

Historia del tiempo de respuesta del pico de desplazamiento



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.3.2. Efectos de la configuración de los retenedores

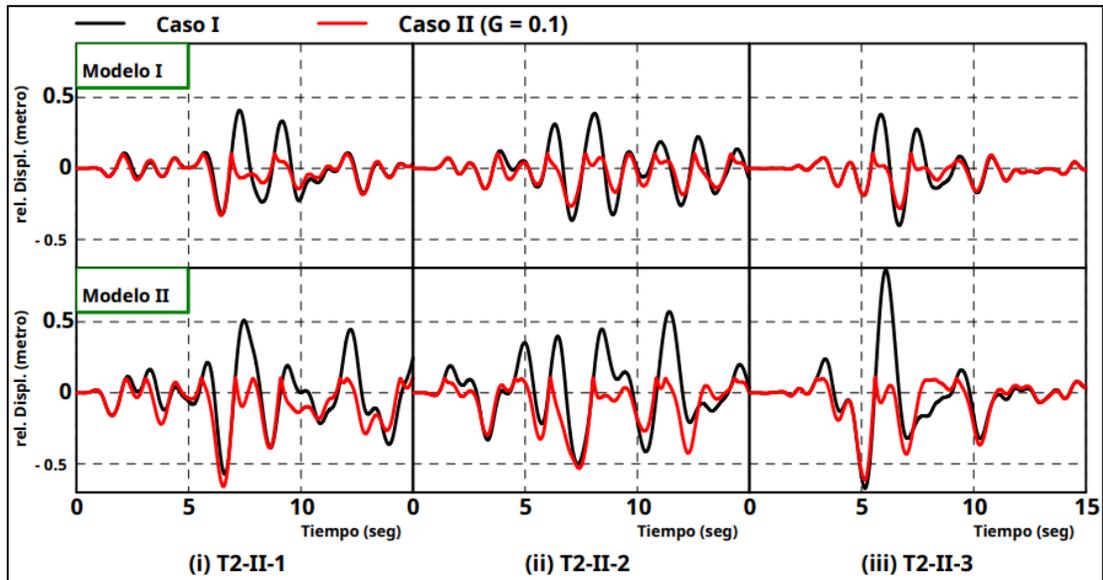
Es ampliamente conocido que los dispositivos de prevención de desmontaje desempeñan un papel crucial en mantener la integridad de un sistema de puente ante excitaciones extremas. Estos dispositivos evitan desplazamientos relativos excesivos entre los tableros o entre el tablero y la subestructura, y previenen incluso la caída de un tablero que se desprende de su soporte. A lo largo del mundo se han utilizado diferentes dispositivos de prevención de desplome, como sujetadores de cables, conexiones entre plataformas adyacentes y conexiones entre el tablero y la subestructura. Los retenedores que conectan tablero a tablero, conocidos como configuración I, han demostrado ser efectivos para minimizar el desplazamiento y reducir las fuerzas de impacto en la junta de expansión en puentes con cojinetes convencionales. Estos retenedores unen un tablero con cojinete móvil a otro tablero en el lado opuesto de la junta de expansión con cojinete fijo. Es importante prestar atención especial al cojinete de aislamiento de la base en los detalles de la junta de expansión.

El uso de limitadores puede garantizar una reducción significativa del desplazamiento relativo y la fuerza de impacto debido a los golpes se reduce considerablemente. Los desplazamientos relativos entre la superestructura y la subestructura en los cojinetes de aislamiento izquierdo y derecho también se reducen ligeramente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

En cuanto a la prevención del desplome en puentes aislados, la configuración I de los limitadores no resulta efectiva, pero sí garantiza la prevención de caídas. Sin embargo, los retenedores a través de la pila (configuración II) y los retenedores a través de la bisagra con llave cortante (configuración III) pueden restringir eficazmente los desplazamientos entre la superestructura y la subestructura, reduciendo así la posibilidad de desmontaje. No obstante, esto se logra a expensas de una mayor demanda de fuerza sísmica en el pilar de apoyo de la junta de dilatación (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 49

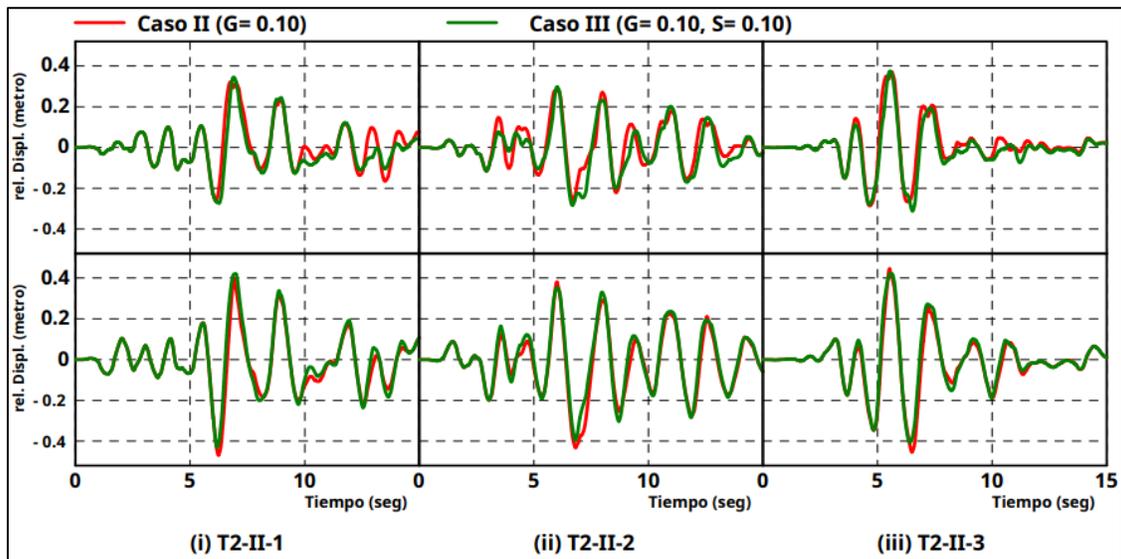
Historia del tiempo de respuesta del desplazamiento relativo de la junta de expansión



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 50

Historia del tiempo de desplazamiento relativo a nivel de LRB



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

La **Tabla 2** presenta los valores máximos promedio seleccionados de la respuesta del puente aislado bajo tres excitaciones sísmicas de diseño estándar, Se observó que los golpes reducen el desplazamiento de separación entre los segmentos del puente (Caso II), pero amplifican el desplazamiento de la plataforma y la aceleración de los segmentos del marco. Para resistir estos efectos, se recomienda proporcionar un ancho de asiento más amplio. El golpeteo y el desplazamiento relativo entre los marcos adyacentes pueden transferir la demanda sísmica de un marco a otro, lo que puede ser perjudicial para la capacidad independiente del marco que recibe la demanda adicional. El estudio también demostró que el uso de retenedores en diferentes configuraciones puede reducir los efectos del golpeteo. En particular, los limitadores a través de la bisagra (Caso III) pueden reducir significativamente la deformación de la junta de dilatación y la fuerza de impacto. Sin embargo, se observó que el desplazamiento relativo a nivel de los retenedores de desplome puede verse afectado, incluso amplificado, lo que aumenta el riesgo de colapso de las cubiertas del puente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Tabla 2

Respuesta pico del Modelo I bajo excitaciones sísmicas reales

Respuesta sísmica		Promedio (12-II-1, T2-II-2, T2-II-3)				
		Caso I	Caso TI	Caso m	Caso IV	Caso V
Desplazamiento de cierre (m)		0.39	0.11	0.10	0.10	0.10
Desplazamiento de separación (m)		0.36	0.29	0.16	0.16	0.21
Fuerza de impacto (MN)		--	45.75	28.04	35.14	35.31
Cortante del pilar de soporte de la junta de dilatación (MN)		4.79	4.81	4.98	11.01	12.20
Momento de flexión del muelle de soporte de la junta de dilatación (MN*m)		95.42	94.96	100.47	217.36	239.30
Marco rígido (izquierda)	Desplazamiento de desmontaje (m)	0.30	0.27	0.29	0.23	0.21
	Desplazamiento de la plataforma (m)	0.41	0.40	0.42	0.42	0.45
	Aceleración de la plataforma (m/s ²)	9.49	114.03	73.97	89.61*	115.23
	Fuerza de corte (MN)	2.51	2.53	2.53	2.66	2.70
	Momento de flexión (MN*m)	49.97	49.12	50.80	52.15	54.22
Marco flexible (derecha)	Desplazamiento de desmontaje (m)	0.45	0.41	0.40	0.36	0.21
	Desplazamiento de la plataforma (m)	0.50	0.50	0.48	0.51	0.49
	Aceleración de la plataforma (m/s ²)	8.37	121.27	80.62	102.29*	112.83
	Fuerza de corte (MN)	3.17	3.28	3.25	3.42	3.27
	Momento de flexión (MN*M)	62.92	63.55	62.44	67.55	63.89

Nota. Adaptado de Raheem & Hayashikawa (2008).

3.2.2.3.3. Amortiguador para mitigar los efectos de golpes

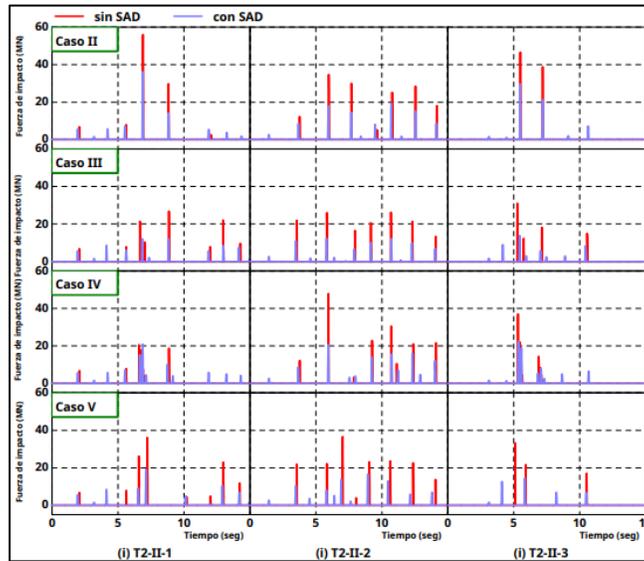
En el diseño de puentes aislados, es importante considerar cuidadosamente los golpes entre las cubiertas adyacentes, ya que pueden causar daños significativos en los pilares y cojinetes. Para mitigar este efecto, se recomienda utilizar amortiguadores entre las cubiertas y en los extremos de los retenedores. Estos amortiguadores ayudan a reducir las fuerzas de reacción en las bases de los pilares y las fuerzas de golpeteo en la superestructura. Los resultados del análisis indican que la colocación de amortiguadores de goma entre los segmentos del puente o en los extremos de los retenedores puede ser una medida efectiva para mitigar el impacto causado por los golpes y los estiramientos de los sujetadores. Estos amortiguadores suavizan los cambios bruscos de rigidez durante los golpes, lo que ayuda a prevenir los picos de aceleración debido a los impactos. En resumen, utilizar amortiguadores adecuados puede ser una práctica mitigadora eficaz contra el efecto de los golpes en los puentes aislados (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Se llevó a cabo un estudio para examinar los efectos de la incorporación de un amortiguador de caucho natural en la respuesta de un modelo de puente aislado. Al comparar la respuesta del puente con y sin los amortiguadores, se observaron diferencias significativas. En el caso del puente sin amortiguadores, los impactos generaron una fuerza de impacto considerable, lo que resultó en picos de alta magnitud en la aceleración experimentada por las cubiertas. Por el contrario, en el puente equipado con los amortiguadores, la fuerza de golpeteo se vio disminuida, lo que a su vez se tradujo en una reducción en la aceleración experimentada por la cubierta. La instalación de los amortiguadores permitió una reducción en la fuerza generada entre las cubiertas en la junta de expansión, la cual se produce debido al impacto y al estiramiento de los sujetadores de cables. Esto a su vez disminuyó los picos de aceleración observados. El dispositivo amortiguador fue capaz de deformarse tanto en compresión como en apertura, lo que le permitió proporcionar resistencia al movimiento relativo de las cubiertas. Conforme el movimiento relativo aumentaba en la dirección de apertura, los amortiguadores se opusieron a la separación de las cubiertas, acumulando resistencia de manera no lineal. Por otro lado, cuando el movimiento relativo se daba en la dirección de cierre, los amortiguadores también se opusieron a dicho movimiento (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Además de mitigar los impactos, los amortiguadores redujeron la fuerza requerida en los sujetadores de cables, lo que podría tener implicaciones favorables en términos de diseño económico.

Figura 51

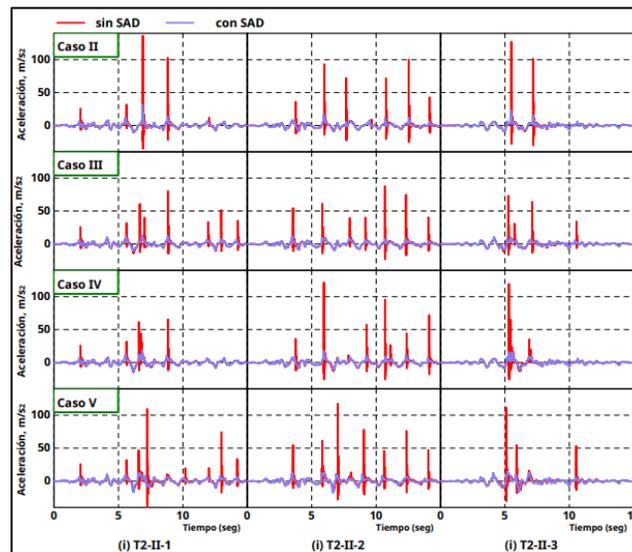
Respuesta de la historia del tiempo de la fuerza de impacto con/sin SAD



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

Figura 52

Respuesta de la historia del tiempo de aceleración con/sin SAD



Nota. Fuente (Raheem & Hayashikawa, 2008).

3.2.2.4. Conclusiones del estudio

- En un esfuerzo por obtener información sobre el problema planteado, en este estudio se investigan los efectos de los golpes en puentes sísmicamente aislados durante terremotos fuertes realizando una modelación analítica utilizando un análisis de respuesta dinámica no lineal, investigando las medidas de control para las respuestas sísmicas de golpes de puentes en carreteras.
- Para el análisis de golpeteo sísmico no lineal, se elaboran modelos de elementos finitos y se examinan varios parámetros que afectan las respuestas sísmicas del golpeteo. Estos parámetros incluyen la relación de frecuencia, tamaño de la brecha y la configuración de los retenedores de cables, las características de la holgura y el movimiento del suelo.
- Los resultados de las simulaciones indican que la efectividad del aislamiento sísmico se puede ver afectada por golpes potenciales cuando se excede la brecha sísmica proporcionada.
- La interacción entre los segmentos adyacentes se dio tanto por impactos como por acoplamiento de los retenedores de cable que unen los segmentos adyacentes.
- La influencia del golpeteo sobre el comportamiento estructural es significativa en la dirección longitudinal del puente y depende en gran medida del tamaño del espacio de la junta entre los segmentos de la estructura en relación con el desplazamiento de separación del modelo sin golpes y características de excitación de entrada.
- Los dispositivos de prevención de desasentamiento mantienen la integridad de un sistema de puente en condiciones extremas. Previenen un exceso de desplazamiento relativo entre tableros e incluso evita la caída del tablero que se desprenda de su apoyo.
- El golpeteo puede amplificar el desplazamiento relativo entre los segmentos adyacentes, para resistir este efecto, es debe proporcionar un ancho de asiento más largo para soportar la plataforma.
- El golpeteo entre segmentos adyacentes transfiere la carga sísmica de uno al otro, esto puede ser perjudicial para la capacidad independiente del segmento que recibe la carga adicional.

- La configuración I de los retenedores de cables que conectan los segmentos adyacentes no es eficaz para prevenir el desplome de los puentes aislados, pero podría garantizar la prevención de caídas. Sin embargo, los retenedores a través del muelle, la configuración II y a través de la bisagra con llave de corte, la configuración III podrían controlar la deformación de la apertura de la junta de expansión.
- Un análisis más detallado mostró que las fuerzas de reacción en las bases de los pilares y las fuerzas de golpeteo ejercidas sobre la super estructura pueden reducirse satisfactoriamente aplicando un método simple de colocar amortiguadores de goma entre los segmentos del puente o en los extremos de los retenedores de cables.
- Los cambios bruscos de rigidez durante el golpeteo pueden suavizarse mediante el uso de los amortiguadores de caucho natural instalados en los extremos de la cubierta y/o en los extremos de los retenedores de cable, por lo tanto, podrían evitar en cierta medida, los picos de aceleración debidos a los impactos.
- La instalación del dispositivo amortiguador reduce significativamente la fuerza entre las cubiertas generadas en la junta de expansión causadas por el impacto y al estiramiento de los retenedores de cables.
- El amortiguador de caucho con un tamaño medio espacio/holgura proporciona un diseño económico y efectivo que podría reducir la fuerza de impacto y la respuesta de aceleración.

3.3. Comparación de la eficiencia de diversos sistemas de retención

Es necesario comparar el rendimiento relativo y distinguir la eficiencia de los sistemas de contención para la prevención de asentamientos en puentes, con el fin de tener información clara que permita seleccionar los sistemas de contención más óptimos para los distintos puentes, dichas comparaciones se pueden realizar gracias a los métodos deterministas y probabilísticos que se han adoptado en la literatura (Xiang et al., 2019).

Andrawes et al. (2007) compararon el comportamiento sísmico de los retenedores SMA con otros dispositivos como (cables de acero, amortiguadores metálicos y amortiguadores viscoelásticos) en el momento de limitar los desplazamientos en las juntas de los puentes se encontró que:

- Para relaciones pequeñas de periodos entre pórticos adyacentes, los amortiguadores viscoelásticos eran más eficientes que los demás dispositivos al momento de limitar los desplazamientos en las juntas.
- Para relaciones moderadas y altas de periodos, los retenedores de SMA eran los más eficientes.
- El comportamiento superelástico de los SMA eran más eficaz que la disipación de energías de los amortiguadores metálicos o viscoelásticos para controlar la apertura de las juntas.

Ghosh et al. (2011) evaluaron el rendimiento relativo de los topes rígidos, los topes elásticos, los retenedores de acero y los retenedores SMA, para la protección de los apoyos elastoméricos durante un terremoto. De este estudio se concluyó que todos los dispositivos permitían controlar la deformación de los apoyos hasta el límite de seguridad si se diseñaban correctamente y que los SMA presentaban un mejor comportamiento en comparación a los demás dispositivos en la contención de desplazamiento sísmicos superiores a los del signo debido al endurecimiento por deformación.

Xiang & Li (2016) compararon el comportamiento sísmico de puentes de carretera apoyados sobre cojinetes de caucho laminados con diferentes dispositivos de prevención de asientos, como chavetas de cizallamiento de hormigón, amortiguadores de hacer a fluencia y amortiguadores de fricción. Demostraron que cuando la dislocación por deslizamiento sísmico del cojinete de caucho se limitaba al mismo valor, resultaban ser más eficientes para mitigar las demandas de ductilidad en las columnas de los pilares, los amortiguadores de acero elástico.

Choi et al. (2010) compararon la eficiencia de tres dispositivos (cables SMA, cables de acero y barras de flexión SMA) en la rehabilitación de un puente de varios vanos usando el método de la función de fragilidad, se demostró que, para reducir la vulnerabilidad sísmica de los puentes, los dispositivos más eficientes eran las barras de flexión SMA.

3.4. Limitaciones de los retenedores existentes

A pesar de la evolución que han tenido los dispositivos de prevención de desasentamiento, aún existen limitaciones que pueden restringir una aplicación más amplia de estos retenedores en puentes, por ello la importancia de ser mencionadas (Xiang et al., 2019).

- Los retenedores basados en rigidez reducen los desplazamientos proporcionando una rigidez adicional a los puentes. La rigidez añadida evita desplazamientos excesivos de la superestructura bajo cargas de servicio y de terremotos pequeños, esto proporciona un confort deseable, aunque para el caso de terremotos moderados y grandes, no es apropiado diseñar un retenedor extremadamente fuerte basado en la rigidez suficiente para controlar los desplazamientos sísmicos, esto permitiría que las fuerzas sísmicas sean atraídas por los fuertes retenedores, esto supone un riesgo alto de falla de la subestructura. Además, si se diseñan con una capacidad baja, la eficiencia de estos en la contención de los desplazamientos puede reducir considerablemente (Xiang et al., 2019).
- Las limitaciones de los retenedores basados en la rigidez pueden superarse usando retenedores de disipación de energía. Los retenedores de disipación de energía están diseñados para absorber una gran cantidad de energía con el fin de reducir significativamente los desplazamientos de la superestructura, especialmente en terremotos moderados y grandes, pero carecen de mecanismos de recentrado, esto puede permitir que se den grandes desplazamientos residuales tras terremotos fuertes. Por esta razón los retenedores de disipación de energía no son favorables para la rehabilitación rápida luego de un terremoto se considere una prioridad (Xiang et al., 2019).
- Los retenedores autocentrantes tienen la capacidad de recentrarse y disipar la energía, esto lo hace superior a otros retenedores en la prevención de desprendimientos, pero los retenedores autocentrantes siguen presentando varias limitaciones. En primer lugar, en el caso de los retenedores de SMA, los principales factores que limitan la aplicación a gran escala de estos son el elevado costo y el exigente mecanizado de los SMA, aunque el costo de los SMA ha disminuido con el desarrollo de la ingeniería de materiales, pero sigue siendo muy elevado en comparación con otros materiales de retención, además que, su precio varía drásticamente con los tamaños de los SMA (Xiang et al., 2019).

- Con respecto a la mecanización de los SMA, también presenta un gran problema ya que los equipos y técnicas actuales hacen que sea difícil la fabricación de una barra de SMA de gran diámetro lo cual sería adecuado para aplicaciones estructurales. Además, la soldadura y el anclaje de los SMA son igual de problemáticos debido a su sensibilidad a factores como la temperatura (Xiang et al., 2019).
- Un sistema híbrido de sujeción autocentrante formado por varios componentes por lo general requiere un diseño y un proceso de fabricación complicados, dado que los componentes de un sistema de retención híbrido se combinan y trabajan conjuntamente para dar la respuesta de autocentrado, pero el fallo de cualquiera de ellos puede volver ineficaz el sistema de retención, por lo que el diseño de los componentes y conexiones de un retenedor híbrido es muy exigente (Xiang et al., 2019).
- Para un retenedor autocentrante, que su histéresis tenga forma de bandera limita su capacidad de disipación de energía. (Goto et al., 2013) descubrieron que, si este se diseña para alcanzar la misma demanda de desplazamiento, el sistema de retención autocentrante impone una mayor demanda de fuerza sobre la subestructura del puente, en comparación con los retenedores histeréticos o viscosos debido a la menor disipación de energía.

4. Conclusiones

- Se analizaron los diferentes dispositivos de retención en puentes para mitigar los desplazamientos relativos longitudinales y así evitar que se presentara luego de un terremoto el desasentamiento de los elementos de los apoyos, en los distintos análisis presentados se mostraron sus características, aplicación y de qué forma eran eficientes para mejorar el comportamiento del puente ante eventos sísmicos.
- Se definieron los dispositivos más comunes para la mitigación de los desplazamientos relativos longitudinales y se mostraron ejemplos de cada uno, describiendo sus principales características y usos.
- Se evaluaron los beneficios que cada uno de los dispositivos presenta, con el fin de identificar de acuerdo a las necesidades y condiciones del sitio cuales eran los más adecuados.
- Se presentó tanto la eficiencia como las limitaciones de cada uno de los dispositivos donde el más eficiente resulta ser las barras de flexión SMA ya que es el que más beneficios presenta, aunque una de sus limitaciones es el alto costo.
- Al analizar lo explicado en el documento y el uso de cada uno de los dispositivos para mitigar los desplazamientos relativos longitudinales, se encontró que estos son más eficientes cuando son utilizados en los estribos de los puentes ya que se demostró que los desplazamientos en las juntas se reducen significativamente cuando se implementan retenedores de SMA en los estribos.
- Se deja claro cuales dispositivos son más eficientes en zonas de amenaza sísmica baja, media y alta, ya que Colombia es un país que se encuentra mayormente en zonas de amenaza sísmica media y alta de acuerdo a un censo realizado por el DANE en 2018, el cual concluyó que Colombia cuenta aproximadamente con 48 millones de personas y que cerca del 87% se encuentra expuesta a estas zonas de amenaza sísmica y que más del 82% está expuesta a amenaza sísmica alta debido a movimientos en masa. (UNGRD, 2020). Por lo tanto, los dispositivos más adecuados serían los amortiguadores viscosos de fluidos y las barras de flexión de SMA, frente a grandes desplazamientos longitudinales.

5. Referencias

- AASHTO. (2001). *A policy on geometric design of highways and streets, 2001*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdel Raheem, S. E., & Hayashikawa, T. (2008). *Control Strategy for Seismic Pounding Mitigation of Bridge Structures*. 33–40. <https://doi.org/10.2749/222137808796105892>
- Adachi, Y., & Unjoh, S. (1999). *Development of Shape Memory Alloy Damper for Intelligent Bridge Systems*. <http://spiedl.org/terms>
- Andrawes, B., Asce, A. M., & Desroches, R. (2007). *Comparison between Shape Memory Alloy Seismic Restrainers and Other Bridge Retrofit Devices*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1084-0702200712:6700>
- Andrawes, B., & Desroches, R. (2005). Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices. *Smart Materials and Structures*, 14(3). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/3/008>
- Bazaez, R., & Vega, A. (2018). Seismic Assessment of Repaired Bridges in Chile. *2018 Structures Congress, Incheon, Korea*.
- Choi, E., DesRoches, R., & Nielson, B. (2004). Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones. *Engineering Structures*, 26(2), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.09.006>
- Choi, E., Lee, D.-H., & Choei, N.-Y. (2009). *Shape Memory Alloy Bending Bars as Seismic Restrainers for*.
- Choi, E., Park, J., Yoon, S. J., Choi, D. H., & Park, C. (2010). Comparison of seismic performance of three restrainers for multiple-span bridges using fragility analysis. *Nonlinear Dynamics*, 61(1–2), 83–99. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9633-6>
- Desroches, R., & Delemont, M. (2002). Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. In *Engineering Structures* (Vol. 24). www.elsevier.com/locate/engstruct
- DesRoches, R., Pfeifer, T., Leon, R. T., & Lam, T. (2003). Full-Scale Tests of Seismic Cable Restrainer Retrofits for Simply Supported Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 8(4), 191–198. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2003\)8:4\(191\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2003)8:4(191))

- Dicleli, M., Asce, M., Mansour, M. Y., Asce, A. M., & Constantinou, M. C. (n.d.). *Efficiency of Seismic Isolation for Seismic Retrofitting of Heavy Substructured Bridges*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1084-0702200510:4429>
- Dong, J., Cai, C. S., & Okeil, A. M. (2011). Overview of Potential and Existing Applications of Shape Memory Alloys in Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 16(2), 305–315. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000145](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000145)
- Ghosh, G., Singh, Y., & Thakkar, S. K. (2011). Seismic response of a continuous bridge with bearing protection devices. *Engineering Structures*, 33(4), 1149–1156. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.033>
- Goto, Y., Ebisawa, T., Wada, H., & Matsuzawa, A. (2013). 超弾性合金と超塑性合金からなる自己修復型複合構造ダンパー. 構造工学論文集, 59.
- Jennings, P. C., George, W. H., & Donald, E. H. (1971). *Engineering features of the San Fernando earthquake*.
- Li, S., Hedayati Dezfouli, F., Wang, J.-Q., & Alam, M. S. (2018). Displacement-Based Seismic Design of Steel, FRP, and SMA Cable Restrainers for Isolated Simply Supported Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 23(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001231](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001231)
- Li, S., Zhang, F., Wang, J., Alam, M. S., & Zhang, J. (2017a). Effects of Near-Fault Motions and Artificial Pulse-Type Ground Motions on Super-Span Cable-Stayed Bridge Systems. *Journal of Bridge Engineering*, 22(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001008](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001008)
- Li, S., Zhang, F., Wang, J. quan, Alam, M. S., & Zhang, J. (2017b). Seismic responses of super-span cable-stayed bridges induced by ground motions in different sites relative to fault rupture considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.016>
- Malhotra, P. K., Huang, M. J., & Shakal, A. F. (1995). SEISMIC INTERACTION AT SEPARATION JOINTS OF AN INSTRUMENTED CONCRETE BRIDGE. In *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS* (Vol. 24).
- Mitoulis, S. A., Tegos, I. A., & Stylianidis, K. C. (2013). A new scheme for the seismic retrofit of multi-span simply supported bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(7), 719–732. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.609175>

- MOP. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES DE CAMINOS Y PUENTES*.
- Muthukumar, S. (2003). *UN ENFOQUE DE ELEMENTO DE CONTACTO CON AMORTIGUACIÓN POR HISTÉRESIS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE PUNTAJES EN PUENTES*.
- Ölander, A. (1932). *[CONTRIBUTION FROM THE CHEMICAL LABORATORY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA I AN ELECTROCHEMICAL INVESTIGATION OF SOLID*.
- Ospina, A. (2012). *Método basado en desplazamientos para el diseño y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de concreto reforzado*.
- Raheem, S. E. A., & Hayashikawa, T. (2008). *INNOVATIVE CONTROL STRATEGY FOR SEISMIC POUNDING MITIGATION OF BRIDGE STRUCTURES*.
- Rahman Bhuiyan, M. A., & Alam, M. S. (2012). Seismic Vulnerability Assessment of a Multi-Span Continuous Highway Bridge Fitted with Shape Memory Alloy Bars and Laminated Rubber Bearings. *Earthquake Spectra*, 28(4), 1379–1404. <https://doi.org/10.1193/1.4000089>
- Reginald DesRoches, B., Member, A., & Fenves, G. L. (2000). DESIGN OF SEISMIC CABLE HINGE RESTRAINERS FOR BRIDGES. In / *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*.
- Saadeghvaziri, M. A., & Yazdani-motlagh, A. (1999). NONLINEAR REPOSENSE OF MSSS BRIDGES UNDER EARTHQUAKE GROUND MOTIONS : CASE STUDIES Final Report OCTOBER 1999 BY. *Security, October*.
- Shrestha, B., Hao, H., & Bi, K. (2017). Devices for protecting bridge superstructure from pounding and unseating damages: an overview. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(3), 313–330. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1170155>
- Soldano Exequiel. (2018). *“Estudio del comportamiento de la sección cajón del tablero de un puente en curva*.
- Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Wiley.
- Tamai, H., Lu, C., & Yuki, Y. (2020). New design concept for bridge restrainers with rubber cushion considering dynamic action: A preliminary study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19). <https://doi.org/10.3390/app10196847>

- Tandon, M. (2005). 25th ISET annual lecture Economical design of earthquake-resistant bridges. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 42(1), 13–20.
- Unión, A., & Guzmán, M. (2010). *Nuevos criterios sísmicos para el diseño de puente en Chile*.
- Vierya, Ing. S. M. (2017). *FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL INFLUENCIA DE APOYOS , JUNTAS Y TOPES EN LA RESPUESTA SÍSMICA*.
- Wang, J. quan, Li, S., Hedayati Dezfuli, F., & Alam, M. S. (2019). Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges. *Engineering Structures*, 189, 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.091>
- Wilde, K., Gardoni, P., & Fujino, Y. (2000). Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. In *Engineering Structures* (Vol. 22). www.elsevier.com/locate/engstruct
- Xiang, N., Goto, Y., Obata, M., & Alam, M. S. (2019). Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 194(February), 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.051>
- Xiang, N., & Li, J. (2016). Seismic Performance of Highway Bridges with Different Transverse Unseating-Prevention Devices. *Journal of Bridge Engineering*, 21(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000909](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000909)
- UNGRD. (23 de 04 de 2020). *Unidad Nacional para la Gestión del riesgo de Desastres*. Obtenido de Unidad Nacional para la Gestión del riesgo de Desastres: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Colombia-un-pais-con-multiples-amenazas-geologicas-pero-por-que-sucede-esto-en-la-UNGRD-se-lo-explicamos.aspx#:~:text=Bajo%20ese%20contexto%2C%20Colombia%20con%20una%20poblaci%C3%B3n%20de,encuent>