

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**
FACULTAD DE INGENIERÍA



**“Evaluación de la capacidad de aislamiento sísmico de apoyos
convencionales de neopreno para puentes en función de su
respuesta dinámica”**

Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería

PRESENTADA POR:

Ing. Christopher Gutiérrez Luna

PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias de la Ingeniería

CON ACENTUACIÓN EN:

Estructuras

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Valdés González

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Alberto González Pérez

Ciudad Universitaria, Toluca, México, Mayo 2016

Resumen

En este trabajo se estudia la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en los puentes vehiculares. El propósito del estudio es valorar la capacidad de aislamiento sísmico de este tipo de apoyos, a partir de los resultados obtenidos en distintos modelos de elemento finito representativos de ellos. Se analizan diferentes configuraciones del apoyo de neopreno correspondientes a diferentes valores de rigidez lateral, los cuales son sometidos a fuerzas laterales que corresponden a distintos tipos de sismos, pruebas de vibración y señales teóricas representativas de movimiento del terreno en suelo duro y blando. Para el caso de los modelos sometidos a sismos y a pruebas de vibración, se determinan índices de aislamiento a partir de las máximas aceleraciones que se presentan en la superestructura y en la subestructura, así como de sus correspondientes intensidades de Arias; ello con el fin de verificar si el apoyo de neopreno se comporta como aislador sísmico. Adicionalmente, para el caso de los modelos sometidos a las señales teóricas, se obtienen las curvas de histéresis con el propósito de valorar la cantidad de energía disipada, así como la degradación y el amortiguamiento histérico. Los resultados del trabajo son útiles para tomar decisiones referentes a las características que deben tener los apoyos de neopreno convencionales, con el propósito de aumentar su capacidad de aislamiento sísmico y disipación de energía, en particular, para puentes similares a los que se estudiaron en este trabajo y para los tipos de fuerzas laterales estudiadas. Como resultado, se concluye que la estrategia a seguir para dimensionar los apoyos convencionales de neopreno de un puente, radica en proporcionarles la rigidez horizontal adecuada; con el objetivo de que el periodo fundamental del puente se salga de la zona en que se encuentran los periodos principales de la excitación. Ello con el propósito de evitar el acoplamiento de periodos de la estructura con los de la excitación. Para terreno blando, se recomienda que el periodo de los puentes sea menor a 0.7 s, mientras que terreno duro, dicho periodo deberá ser inferior a 1.5 s.

Introducción

El aislamiento sísmico de las estructuras mediante dispositivos de control es un área de estudio en pleno desarrollo, debido a lo promisorio de los resultados obtenidos hasta el momento. Los aisladores sísmicos son dispositivos que se colocan entre la subestructura y la superestructura de un edificio o de un puente y evitan que el movimiento sísmico del terreno se transmita por completo a la estructura, disminuyéndose de esta forma las fuerzas sísmicas que deban resistirse.

Los puentes comúnmente utilizados en México corresponden al tipo simplemente apoyados, los cuales en la mayoría de los casos utilizan apoyos convencionales de neopreno que se componen de láminas de neopreno y de acero intercaladas. Esta configuración de los apoyos es similar a la de los aisladores sísmicos, por lo que en realidad los apoyos convencionales de neopreno se comportan como aisladores durante la ocurrencia de temblores; no obstante que su función principal es absorber las deformaciones de la superestructura causados por los cambios de temperatura así como por las fuerzas de frenado. Por ello, resulta de interés conocer el comportamiento de este tipo de apoyos en su trabajo como aisladores sísmicos.

En este trabajo se lleva a cabo un estudio analítico con base en modelos de elemento finito para evaluar la capacidad de aislamiento sísmico de un apoyo convencional de neopreno. Se estudian modelos con diferente rigidez lateral, los cuales se someten a diferentes cargas laterales correspondientes a sismos, pruebas de vibración y señales teóricas.

Este estudio servirá para conocer de mejor manera el comportamiento como aisladores sísmicos, de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en la mayoría de los puentes vehiculares.

Esta tesis cumple con lo establecido en el reglamento de estudios avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México (Capítulo 8, artículos 57, 59 y 60) para la obtención del grado en la modalidad de tesis por artículo especializado. Se compone de las siguientes partes: Resumen, Introducción, Parte I: Protocolo de tesis y Parte II: Artículo de investigación.

Contenido

Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Introducción.....	IV
PARTE I. PROTOCOLO DE TESIS	1
I. Datos generales.....	2
II. Título y resumen.....	2
III. Objetivos.....	2
IV. Planteamiento.....	3
V. Plan de trabajo.....	5
PARTE II. ARTICULO DE INVESTIGACIÓN	7
Acuse de recibo.....	8
1. Introducción.....	11
2. Caso de estudio.....	13
3. Estudio analítico.....	14
4. Resultados.....	16
5. Análisis de resultados.....	19
6. Conclusiones.....	21
7. Referencias.....	22

PARTE I
PROTOCOLO DE
INVESTIGACIÓN

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería

Coordinación de Estudios Avanzados

Protocolo de Tesis de Maestría

I. Datos Generales.

Programa de estudio	Maestría en Ciencias de la Ingeniería
Tesista	Christopher Gutiérrez Luna
Tutor Académico	Dr. Jesús Valdés González / Dr. Carlos Alberto González Pérez
No. De revisión¹	1ª <input type="checkbox"/> 2ª <input type="checkbox"/> 3ª <input checked="" type="checkbox"/>

II. Título y resumen.

Título
Evaluación de la capacidad de aislamiento sísmico de apoyos convencionales de neopreno para puentes en función de su respuesta dinámica

Resumen
En este trabajo se estudia la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en los puentes vehiculares. El propósito del estudio es valorar la capacidad de aislamiento sísmico de este tipo de apoyos, a partir de los resultados obtenidos en distintos modelos de elemento finito. Se analizan distintas configuraciones del apoyo de neopreno correspondientes a diferentes valores de rigidez lateral, los cuales se someten a cargas laterales que corresponden a sismos, pruebas de vibración y señales teóricas cuyas características corresponden a señales de terreno blando y duro. Para el caso de los modelos sometidos a sismos y pruebas de vibración, se obtienen determinados índices en función de las aceleraciones y la intensidad de Arias, que permiten valorar la efectividad de los apoyos en su desempeño como aisladores de base. Para los modelos sometidos a las señales teóricas se determinan las curvas de histéresis con el fin de observar la cantidad de energía disipada, así como la degradación o incremento que se llega a presentar en el amortiguamiento. Los resultados del trabajo son útiles para tomar decisiones referentes a las características que deben tener los apoyos de neopreno convencionales, con el propósito de aumentar su capacidad de aislamiento sísmico y disipación de energía.

III. Objetivos.

Objetivo General
Evaluar la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno para puentes y relacionar su rigidez lateral con el nivel de aislamiento sísmico que proporcionen.

Objetivos Específicos
<ul style="list-style-type: none">• Tipificar el tipo de puente comúnmente utilizado en México así como su correspondiente apoyo de neopreno.• Modelar con elemento finito los apoyos convencionales de neopreno.• Obtener la respuesta dinámica de los apoyos de neopreno convencionales en función de distintas configuraciones de rigidez lateral (configuración geométrica)• Caracterizar el nivel d aislamiento sísmico de los apoyos de neopreno en función de su rigidez lateral y del tipo de caraga lateral que se aplique.

IV. Planteamiento.

Introducción

La ocurrencia de sismos ha cobrado la vida de miles de personas y cuantiosas pérdidas materiales en distintos países que se encuentran en zonas de considerable actividad sísmica, por ello es importante contar con herramientas útiles de reforzamiento y modificación de la respuesta estructural que minimicen los efectos sísmicos en las estructuras.

Entre las alternativas de reforzamiento estructural destacan arriostramientos metálicos, pantallas de concreto reforzado, encamisados de concreto, encamisados de acero, platinas metálicas, adición de perfiles metálicos, contrafuertes, postensionamiento externo y materiales compuestos [7]. Por su parte, la modificación de la respuesta estructural se logra mediante disipadores de energía (amortiguadores) y aisladores de base [8].

En este trabajo se presta especial atención a los aisladores de base, los cuales modifican la respuesta de la estructura teniendo como función desacoplar a la estructura del movimiento del suelo, concentrando la mayor parte de la disipación de la energía en la deformación del aislador, evitando que la estructura sufra daño [8].

Los aisladores de base han tenido un gran desarrollo en los últimos años, siendo utilizados en varios países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda y otros países de Sudamérica entre los que destacan Chile y Colombia [2]. Se han utilizado tanto en estructuras de edificios como en puentes.

Durante la ocurrencia de un temblor la energía sísmica se transmite a las construcciones, las cuales deben ser lo suficientemente resistentes para absorber dicha energía aceptando en algunos casos determinado nivel de daño estructural. La función de los aisladores sísmicos es absorber esa energía sísmica por medio de deformaciones y evitar que se transmita a la estructura. Se acepta que ante la ocurrencia de sismos intensos los aisladores trabajen como fusibles que se dañan pudiendo quedar inservibles para posteriormente ser sustituidos. Los aisladores se componen principalmente de láminas o placas de acero y de neopreno intercaladas entre sí.

A lo largo del tiempo han variado las características en los aisladores de base, como es el caso que presenta Kelly (1981) proponiendo la sustitución de las placas de acero por teflón. El sistema cuenta con una varilla de acero que conecta a a superestructura con la subestructura diseñada para fallar cuando las fuerzas producidas por el temblor exceden de cierto umbral [5].

En México, el ingeniero Manuel González Flores (1964) desarrolló un sistema de aislamiento de base con placas de acero y de balines. Su principal limitación se encuentra en la carencia de un dispositivo disipador de energía que reduzca la demanda de disipación de la estructura [4]. Un sistema similar pero con control de desplazamiento se propuso por Anderson (1990). El dispositivo redujo en 30% la aceleración de un marco de acero de diez niveles [1].

Los apoyos convencionales de neopreno se diseñan para absorber las deformaciones de la superestructura del puente debidas a cambios de temperatura y fuerzas de frenado; sin embargo debido a que su configuración es muy similar a la de los aisladores sísmicos se espera que ante la ocurrencia de un temblor este tipo de apoyos funcionen como aisladores. De ahí el interés de conocer el nivel de aislamiento que proporcionan este tipo de apoyos.

Antecedentes y/o justificación

A lo largo de la historia han ocurrido un sin fin de desastres relacionados con la actividad sísmica. Eventos importantes y que han tenido gran impacto en la humanidad son los ocurridos en la Ciudad de México en 1985, Northridge, California en 1994, Kobe, Japón en 1995, Armenia Colombia en 1999, Izmit Turquía en 1999 por citar sólo algunos, que causaron la muerte de miles de personas [3].

La primera noción de control estructural tuvo su origen hace poco más de cien años en Japón, cuando se construyó una casa de madera sobre unas bolas de acero para demostrar que se podía aislar de un sismo. En Estados Unidos en el año de 1870 se registró una patente sobre un edificio apoyado sobre bolas de acero contenidas en un disco delgado dentro del cual se podían deslizar [3].

Otras patentes conocidas se obtuvieron en Alemania en 1907 y en Inglaterra en 1909. Ambas eran sistemas primitivos de deslizamiento. En épocas más recientes (1959) se utilizó un sistema de aislamiento en Ashkhabad, Turkmenistán. Dicho sistema consistía en cables que suspendían a la estructura permitiendo un movimiento tipo péndulo [3]. El desarrollo formal de los aisladores de base se inicia realmente a finales de la década de 1960.

El neopreno es la marca comercial para una familia de cauchos sintéticos basadas en el policloropreno. El cual fue inventado por científicos de la empresa DuPont, el cual es un elastómero que presenta gran capacidad de deformación que favorece su capacidad de disipación de energía. Se han realizado varios estudios experimentales sobre las características físicas de los elastómeros. Los trabajos que se han realizado tienen que ver con la dureza, elongación, compresión y corte del elastómero, todo esto con el objetivo de generar curvas de histéresis que permitan conocer su capacidad de disipar energía [6].

Los aisladores han tenido gran aceptación en el diseño estructural en diversos países, sin embargo en México no han sido utilizados de igual forma. Es preciso decir que en México se encuentra en una zona de mucha actividad sísmica, por lo que sería ideal utilizar dispositivos de control de la respuesta en el diseño estructural.

Definición del problema

En la práctica convencional del diseño estructural de puentes, los apoyos de neopreno se diseñan fundamentalmente para absorber las contracciones y elongaciones de la superestructura del puente debidas a cambios de temperatura; sin embargo, es evidente que durante la ocurrencia de un sismo dichos apoyos de neopreno trabajan como aisladores sísmicos. Actualmente el trabajo como aislador sísmico de los apoyos convencionales de neopreno no está claramente reconocido, por lo que los estándares de diseño no dan recomendaciones específicas al respecto. Es por lo tanto de interés estudiar el desempeño de dichos apoyos convencionales de neopreno como aisladores sísmicos.

En el caso de puentes, la norma mexicana SCT para el diseño de puentes carreteros [9] reconoce en forma general la efectividad de los apoyos convencionales de neopreno como aisladores sísmicos. Esto lo hace mediante una reducción de las fuerzas sísmicas que la superestructura le transmite a la subestructura del puente, sin embargo dicha recomendación carece de estudios formales que le den completa validez.

Hipótesis

La respuesta sísmica de los puentes disminuye debido al trabajo como aislador sísmico de los apoyos convencionales de neopreno, en función de las características de la fuerza lateral aplicada.

Alcances y limitaciones

Los alcances y las limitaciones de la investigación se definen a continuación:

- Este estudio se limita a la evaluación del comportamiento dinámico de los apoyos convencionales de neopreno para puentes simplemente apoyados típicos en México.
- El estudio se limita a un análisis por elemento finito de los apoyos de neopreno analizados.
- El modelo se analizará de manera independiente a la superestructura y subestructura del puente.
- El análisis de los modelos se realizará bajo la acción de cargas sísmicas representativas de terreno duro y blando, funciones analíticas de tipo armónico y pruebas de vibración armónica.

Metodología

1.- Selección del tipo de puente y apoyo de neopreno más comúnmente utilizados en México que se van a estudiar en este trabajo.

2.- Modelado por elementos finitos del apoyo de neopreno.

3.- Análisis paramétrico del apoyo de neopreno en función de su rigidez lateral (configuración geométrica), considerando distintos tipos de carga.

4.- Análisis de resultados para formular recomendaciones de diseño.

V. Plan de trabajo.

Temática propuesta

1) **Introducción**

2) **Caso de estudio**

3) **Estudio analítico**

4) **Resultados**

5) **Análisis de resultados**

6) **Conclusiones**

7) **Referencias**

Referencias

- [1] Anderson, T. L. (1990). Seismic isolation design and construction practice. Proceedings of Fourth U. S National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California.
- [2] L. M. Bonilla (2012). *Teoría del Aislamiento Sísmico para Edificaciones*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] M. J. Díaz, J. M. Jara, J. R. Casas. *Protección sísmica de estructuras con dispositivos de control*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [4] González M. (1964). Sistema para eliminar los esfuerzos peligrosos que los temblores causan en las estructuras, V Congreso Mexicano de la industria de la construcción, Tijuana Baja California, México.
- [5] Kelly, J. M (1981). Control of seismic response of piping systems and other structures by base isolation. Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley.
- [6] E. H. C. Manosalvas (2011). *Análisis de los elementos elastómeros utilizados en aisladores y neoprenos*. Tesis de licenciatura. Escuela Politécnica del Ejército.
- [7] J. A. Oviedo, M. del P. Duque (2006). *Sistemas de Control de respuesta Sísmica en Edificaciones*. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- [8] Luis A. Prota (1965). Los apoyos de neopreno para puentes y estructuras. *Revista de Obras Públicas*.
- [9] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT (2009). Normas para el diseño de puentes carreteros. Cap. 6 Sismo.

Cronograma en meses

Actividad	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1. Revisión bibliográfica												
2. Formulación del estado del arte												
3. Tipificación de puentes y apoyos												
4. Construcción de modelos geométricos												
5. Obtención de respuesta dinámica en función de la configuración geométrica.												
6. Optimización de los apoyos convencionales de neopreno												
7. Redacción de la Tesis.												

Nombre y firma del tesista	Nombre y firma de los tutores académicos	
Ing. Christopher Gutiérrez Luna	Dr. Jesús Valdés González	Dr. Carlos Alberto González Pérez

PARTE II
ARTÍCULO DE
INVESTIGACIÓN

Envío de artículos

[Homepage](#) [Artículos](#) [Envío de artículo](#)

Si desea hacemos llegar su Artículo para su publicación en la Revista DYNA, rellene el siguiente formulario, tras haber leído la normativa correspondiente.



BUSCAR CONTENIDOS
SEARCH CONTENTS

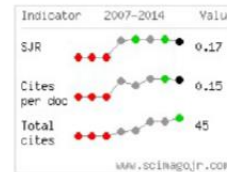
CONDICIONES DE ENVÍO DEL ARTÍCULO

NORMAS RESUMIDAS PARA LOS AUTORES DE ARTÍCULOS, COSTE DE PUBLICACIÓN Y CESIÓN DE DERECHOS (IMPORTANTE)

Los campos marcados con * son obligatorios

Datos del Autor

Nombre y Apellidos: * Christopher Gutiérrez Luna	Titulos Académicos: Ingeniero Electromecánico
Colegio / Asociación: Facultad de Ingeniería	Institución / Afiliación: * Universidad Autónoma del Estado de México
Dirección: Cerro de Coatepec s/n	C.P.: 50130
Población: Ciudad Universitaria	Provincia: Toluca, Estado de México
Teléfono: * +52 1 722 486 28 34	Email:* chrisvelca@hotmail.com
ORCID: <input type="text"/>	
Adjuntar Curriculum:* Examinar... Ningún archivo seleccionado.	



Datos del Artículo

Título:*
EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO SÍSMICO DE APOYOS CONVENCIONALES DE NE

Disciplina / Subdisciplina:
Tecnología de Construcción/Puentes

Palabras Clave:*
Apoyos de neopreno, aislamiento sísmico, puentes vehiculares, disipación de energía

Adjuntar Artículo:*
Examinar... Ningún archivo seleccionado.

Resumen:*
En este trabajo se estudia la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en los puentes vehiculares. El propósito del estudio es valorar la capacidad de aislamiento sísmico de este tipo de apoyos, a partir de los resultados obtenidos en distintos modelos de

He leído y acepto las condiciones de Envío de Artículos *

La solicitud N°0102/2016 ha sido enviada correctamente.

[Volver](#) [Imprimir](#)

De: Marta Ferrero
Enviado: lunes, 25 de abril de 2016 06:05 a. m.
Para: 'CHRISTOPHER GUTIERREZ LUNA'
CC: 'jmhernandez@revistadyna'
Asunto: RE: <http://www.revistadyna.com> - Peticion de informacion para tramitacion del articulo: 8034-53000

Estimado autor,
Agradeciéndole el envío de los datos solicitados, le informo que el proceso de alta ha finalizado y su paper ha sido enviado a evaluar.
El Proceso de Revisión entre Pares suele tardar entre 30-60 días; en cuanto dispongamos del éxito final de la revisión, se lo comunicaremos.
Sin embargo, podrá también controlar el estado del paper a través de nuestra Web www.revistadyna.com en el apartado "Autores y Evaluadores", "Situación de artículos en proceso de evaluación".
Un cordial saludo

Marta

Marta Ferrero
Publicaciones DYNA
Alda. Mazarredo, 69
E-48009 Bilbao (SPAIN)
Tel +34 944 237 566
email: publicaciones@revistadyna.com
web: <http://www.publicacionesdyna.com>

"Dyna Publicando Ingeniería desde 1926"

Síguenos en:



=====
La información contenida en este mensaje electrónico, como en los documentos adjuntos, que pudiera contener, puede ser información confidencial sometida a secreto profesional y privilegiada para uso exclusivo de la persona o personas a las que va dirigido, cuya divulgación esta prohibida en virtud de la legislación vigente. No está permitido el acceso a este mensaje a cualquier otra persona distinta a los indicados. De modo que si usted, no es uno de los destinatarios, se le informa de que su lectura, cualquier duplicación, reproducción, distribución a terceros, así como cualquier uso de la información contenida así como de los documentos adjuntos, o cualquiera otra acción u omisión tomada en relación con el mismo, sea cual sea su finalidad, sin la previa autorización escrita de PUBLICACIONES DYNA SL está prohibida y puede ser ilegal. Por lo tanto, si ha recibido este mensaje por error, le rogamos nos lo comuniqué de forma inmediata por esta misma vía y proceda a su eliminación puesto que no está autorizado a usarlo, así como a la de cualquier documento adjunto al mismo. Gracias por su colaboración
=====

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO SÍSMICO DE APOYOS CONVENCIONALES DE NEOPRENO PARA PUENTES

Christopher Gutiérrez Luna¹ Ingeniero Electromecánico (Alumno de la Maestría en Estructuras)
Jesús Valdés González ¹ Doctor en Ingeniería
Carlos Alberto González Pérez ² Doctor en ingeniería

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria
C.P 50130, Toluca, Estado de México, Tel: +52 7222140855

²Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec s/n, Ciudad
Universitaria C.P 50110, Toluca Estado de México, Tel: +52 7222140414

Recibido: -- Aceptado: - DOI: 10.(A cumplimentar por el Editor)

EVALUATION OF THE SEISMIC ISOLATION CAPACITY OF CONVENTIONAL BRIDGE RUBBER BEARINGS

ABSTRACT:

In this paper the dynamic response of conventional bridge rubber bearings is studied. The purpose of the study is to assess the ability of seismic isolation of this type of bearings, from the results of the analysis of finite element models. Different configurations of rubber bearings corresponding to different lateral stiffness are analyzed. These models are subjected to different signals of lateral load, corresponding to earthquakes, vibration tests and theoretical signals which are representative of soft and firm soil. In the case of models excited with earthquake and vibration tests, different indexes were obtained through the recorded acceleration and Arias intensity which allow to evaluate the performance of the conventional rubber bearings as seismic isolation devices. In addition, for the case of the models subject to theoretical signals, hysteresis curves were obtained in order to estimate the amount of energy that was dissipated during the tests. The obtained results are useful to make decisions concerning to the characteristics required for the conventional rubber bearings in order to increase their ability as seismic isolators and energy dissipation devices.

Keywords: Rubber bearings, seismic isolation, vehicular bridges, energy dissipation.

RESUMEN:

En este trabajo se estudia la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en los puentes vehiculares. El propósito del estudio es valorar la capacidad de aislamiento sísmico de este tipo de apoyos, a partir de los resultados obtenidos en distintos modelos de elemento finito. Se analizan distintas configuraciones del apoyo de neopreno correspondientes a diferentes valores de rigidez lateral, los cuales se someten a cargas laterales que corresponden a sismos, pruebas de vibración y señales teóricas cuyas características corresponden a señales de terreno blando y duro. Para el caso de los modelos sometidos a sismos y pruebas de vibración, se obtienen determinados índices en función de las aceleraciones y la intensidad de Arias, que permiten valorar la efectividad de los apoyos en su desempeño como aisladores de base. Para los modelos sometidos a las señales teóricas se determinan las curvas de histéresis con el fin de observar la cantidad de energía disipada, así como la degradación o incremento que se llega a presentar en el amortiguamiento. Los resultados del trabajo son útiles para tomar decisiones referentes a las características que deben tener los apoyos de neopreno convencionales, con el propósito de aumentar su capacidad de aislamiento sísmico y disipación de energía.

Palabras clave: Apoyos de neopreno, aislamiento sísmico, puentes vehiculares, disipación de energía.

1.- INTRODUCCION

Los sismos son uno de los más grandes peligros naturales que enfrenta la sociedad. Los sismos han ocasionado la muerte de miles de personas y cuantiosas pérdidas materiales en distintos países que se encuentran en zonas de considerable actividad sísmica. Por ello, es importante contar con herramientas útiles de reforzamiento y modificación de la respuesta estructural que minimicen los efectos sísmicos en las estructuras. Dentro de los dispositivos de control que permiten modificar la respuesta estructural se encuentran los disipadores de energía y los aisladores de base. En particular, los aisladores de base tienen como propósito aislar la estructura del movimiento sísmico, y de esta manera disminuir las fuerzas de inercia que se generan durante los sismos y que deben ser resistidas por la estructura en su conjunto.

Durante la ocurrencia de un temblor la energía sísmica se transmite a las construcciones, las cuales deben ser lo suficientemente resistentes para absorber dicha energía aceptando en algunos casos determinado nivel de daño. La función de los aisladores sísmicos es absorber esa energía sísmica por medio de deformaciones y evitar que se transmita a la estructura. Se acepta que ante la ocurrencia de sismos intensos los aisladores trabajen como fusibles que se dañan pudiendo quedar inservibles para posteriormente ser sustituidos.

En los puentes, los aisladores se colocan entre la subestructura y la superestructura. Su principal efecto es que alargan considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura y por consiguiente, la alejan de las zonas de mayor amplificación del espectro de respuesta.

Los aisladores de base se construyen con láminas de acero y de neopreno intercaladas, las cuales, en algunos casos, se vulcanizan entre sí. Estos dispositivos son comúnmente conocidos como Aisladores Elastoméricos Reforzados con Acero (AERA). Un tipo particular de este tipo de aisladores es aquel que adicionalmente lleva un núcleo de plomo, el cual le proporciona una mayor capacidad de disipación de energía sísmica. En la actualidad se han realizado modificaciones sustituyendo el acero por fibras (carbón, vidrio, nylon y poliéster), lo cual ha mejorado su desempeño. A este tipo de aisladores se les conoce como Aisladores Elastoméricos Reforzados con Fibras (AERF) [1].

Se han realizado diferentes estudios, los cuales han permitido conocer el comportamiento dinámico y estático de los AERA y AERF. Por ejemplo, *Moon et al.* [2] evalúan experimentalmente el desempeño de aisladores elastoméricos multicapas (AERA y AERF). De dicho análisis determinan que los AERF presentan un mejor comportamiento en comparación con los AERA; esto debido a que la rigidez vertical del AERF es tres veces más alto en comparación con el AERA, por otro lado en la prueba horizontal de determinó que el amortiguamiento equivalente del AERF es dos veces más alto en comparación con el AERA y de acuerdo a los lazos de histéresis, los AERF disipan más energía que los AERA alcanzando así mayores valores de desplazamiento. *Kang et al.* [3] presenta un análisis de construcciones aisladas utilizando AERF y AERA sometidas a sismos. El análisis muestra que el amortiguamiento efectivo de los AERF es dos veces más alto que en los AERA y que la rigidez vertical es tres veces más alta que en los AERA. *Valdés et al.* [4, 18] realizaron pruebas experimentales en un puente vehicular, con el propósito de evaluar la capacidad de aislamiento sísmico de los apoyos convencionales de neopreno. Se observó que los apoyos de neopreno funcionan como aisladores sísmicos presentando reducciones del 35% de acuerdo a los cocientes de la intensidad de Arias y del 31% de acuerdo a los cocientes de aceleraciones, esto para el caso en donde las cargas laterales se le inducen al puente en estudio mediante fuerzas de frenado; mientras que en caso de someter la superestructura del puente a cargas laterales dinámicas de tipo armónico, dichas reducciones llegan a ser en promedio del 80% en cuanto a las aceleraciones y del 95% en caso de las intensidades de Arias. *Sánchez et al.* [5] estudiaron la estabilidad estática y dinámica de algunos apoyos elastoméricos. En dicho estudio llevan a cabo un análisis experimental de la estabilidad de los apoyos elastoméricos ante cargas quasi-estática y dinámica para posteriormente predecir la carga crítica en función de los desplazamientos horizontales y el aumento de la carga axial. Observaron que el método quasi-estático es efectivo para determinar experimentalmente la estabilidad de los apoyos elastoméricos, además de que las pruebas quasi-estáticas y dinámicas presentan resultados similares. *Strauss et al.* [6], ensayan apoyos elastoméricos con varios materiales de refuerzo y bajo diferentes condiciones de carga cíclica mostrando la influencia de parámetros tales como el esfuerzo vertical, la deformación horizontal, la altura del apoyo, el número de elastómeros y las capas de refuerzo para determinar la rigidez y amortiguamiento de dichos apoyos. Observaron que para desplazamientos de 10% al 100% de la altura del apoyo se presenta una degradación de la rigidez, siendo alta en los apoyos que no estaban fijos y baja para los que estaban fijos. *Dezfuli et al.* [7] realizan un análisis experimental de distintos modelos de AERF reforzados con fibra de carbono reproducidos a escala bajo un proceso simple de manufactura, los cuales se sometieron a distintas

condiciones de carga. Los resultados mostraron que bajo desplazamientos cíclicos ocurre una delaminación parcial entre la lámina del elastómero y la placa de soporte de acero. También observaron que la rigidez vertical se incrementaba cuando se aumentaba el espesor de las láminas de fibra y se disminuía el espesor de las láminas del elastómero. La flexibilidad en la dirección horizontal se incrementó al momento de aumentar el espesor total de las láminas de elastómero, mientras que la cantidad de energía disipada se incrementa con el aumento del espesor de las láminas tanto de refuerzo como de elastómero.

En forma ideal, el estudio de los apoyos elastoméricos debería realizarse de manera experimental, ya que ésta es la única forma de entender de manera precisa el comportamiento estructural de estos dispositivos. Sin embargo, los altos costos y el tiempo que se requiere para realizar estudios experimentales han limitado este tipo de investigaciones. En los últimos años, con el desarrollo de nuevas tecnologías de cómputo es posible llevar a cabo análisis numéricos que permiten realizar simulaciones que arrojan resultados muy cercanos a los obtenidos en estudios experimentales. Entre estos estudios se encuentran los siguientes: *Toopchi Nezhad et al.* [8], realizan un análisis de AERF sujetos a cargas verticales y laterales estáticas. Se observa que el modelo es capaz de simular condiciones de frontera *bonded* y *unbonded* (superficies de contacto). En la condición *unbonded*, el modelo presenta una demanda de esfuerzos tanto en el elastómero como en las fibras menores a los obtenidos en los aisladores con la condición *bonded*, además, bajo la condición *unbonded*, los modelos presentan una rigidez horizontal más baja y de ahí una eficiencia de aislamiento significativamente mayor que la observada en la condición *bonded*. *Osgoeei et al.* [9], elaboraron un modelo 3D de elemento finito para investigar la respuesta de aisladores AERF rectangulares con tres relaciones de aspecto, los cuales se sometieron a una carga lateral con cuatro ángulos diferentes de incidencia. Los resultados muestran que la rigidez lateral efectiva de los AERF se incrementa con el aumento en la dirección de carga. *Van Engelen et al.* [10], analizan el comportamiento de AERF rectangulares, a los cuales se les modifica su geometría para investigar los efectos en la rigidez vertical y el módulo de compresibilidad además de las distribuciones de esfuerzo y deformación en el material de refuerzo. Observaron que generalmente las modificaciones incrementan el esfuerzo vertical y la distribución de esfuerzo Von Mises en el refuerzo, también notaron que la modificación en el diámetro permite el aislador se comporte como si fueran dos aisladores.

Por otra parte, también se ha incorporado una visión de sustentabilidad en recientes investigaciones realizadas, prueba de ello es el trabajo que realiza *Spizzuoco et al.* [11], quienes estudiaron el efecto que tiene el caucho reciclado en el comportamiento sísmico ante carga vertical y horizontal de los aisladores construidos con este material, en dicho trabajo se observaron las ventajas que tiene este tipo de aisladores AERF, entre las cuales están su alta capacidad de disipación de energía, el bajo costo de manufactura y su peso ligero.

En la búsqueda por hacer más eficiente el comportamiento de los aisladores, de tal forma que disipen mayor cantidad de energía sísmica bajo un comportamiento estable, se han hecho diferentes estudios. Así *Osgoeei et al.* [12], analizan en forma experimental y numérica el efecto que tiene en los aisladores rectangulares la perforación y remoción del centro del aislador. Observaron una reducción en la rigidez lateral efectiva y un mejoramiento en las características de amortiguamiento cuando se hacen las modificaciones en el centro del aislador. En otro trabajo, *Mordini et al.* [13], estudiaron AERF mediante análisis de elemento finito en el aislamiento de un tanque cilíndrico para fluidos con el fin de verificar modelos analíticos, los AERF se consideraron de láminas de elastómero de alto amortiguamiento y láminas de fibra de vidrio. El análisis se realizó bajo dos condiciones (aislado y no aislado), para determinar el daño en el tanque debido a la acción de una señal dinámica. Los resultados mostraron que el sistema aislado reduce el esfuerzo de Von Mises en las paredes del recipiente cilíndrico hasta en un 70%. En otro estudio presentado por *Das et al.* [14], se analiza un AERF sometiéndolo a desplazamiento horizontal cíclico y a carga vertical constante. El aislador se analiza bajo las condiciones *bonded* y *unbonded* (superficies de contacto). Se observó que el aislador en la condición *unbonded* es más efectivo que en la condición *bonded*, debido a que disipa mayor cantidad de energía.

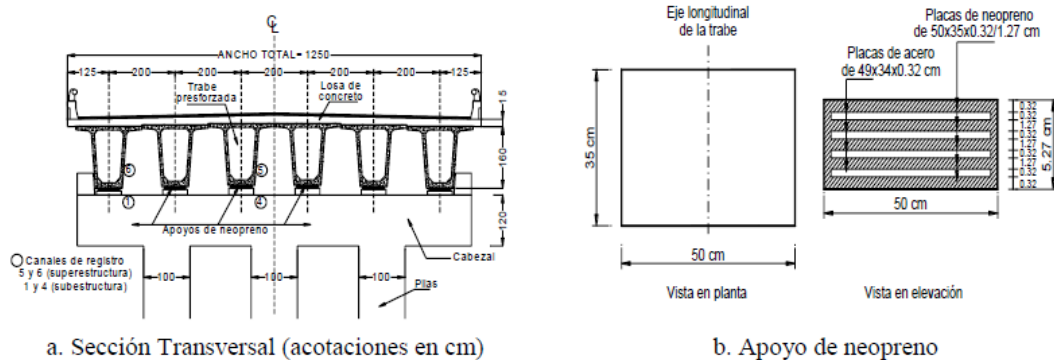
En el presente trabajo, se analiza un apoyo convencional de neopreno de uso común en la mayoría de los puentes simplemente apoyados. Aun cuando este tipo de apoyos no se diseñan como aisladores sísmicos, es evidente que durante la ocurrencia de un sismo pueden funcionar como aisladores sísmicos, de ahí el interés de conocer su efectividad como tal. El objetivo es evaluar la capacidad que como aisladores sísmicos tienen este tipo de apoyos. Para ello se realiza un análisis 3D de elemento finito de distintos modelos representativos de este tipo de apoyos. Los modelos se someten a una carga vertical constante y a diferentes cargas laterales dinámicas. El comportamiento del apoyo de neopreno se evalúa a partir la cantidad de energía disipada, así como de su capacidad de reducción de la respuesta de la superestructura del puente respecto a la de la subestructura.

2.- CASO DE ESTUDIO

Los apoyos de neopreno son dispositivos que se colocan entre la superestructura y la subestructura de los puentes. La función principal de los apoyos convencionales de neopreno es absorber las deformaciones provocadas por los cambios de temperatura y por la vibración ambiental a que esté expuesta el puente [15]. Por su parte, los aisladores sísmicos tuvieron sus primeras aplicaciones en puentes, lo cual se debió a que son muy similares, tanto en forma, como en comportamiento a los apoyos convencionales de neopreno. Se puede decir que el aislador de base es una variante del apoyo de neopreno, de tal forma que el apoyo convencional de neopreno se puede considerar como un AERA.

Los apoyos elastoméricos se diseñan bajo la norma AASHTO, en particular, los apoyos que se estudian en este trabajo se diseñaron de acuerdo a las especificaciones del método B del capítulo 14 para apoyos elastoméricos reforzados con acero (AERA) [16].

En el presente estudio se considera un apoyo elastomérico que soporta una carga vertical de 443.412 kN, el cual forma parte de un puente vehicular simplemente apoyado. El puente tiene 11 claros independientes de 35 m y su superestructura está formada por 6 traveses de concreto presforzado tipo cajón con aletas de 1.60 m de peralte y 2.00 m de ancho, sobre las cuales se apoya una losa de concreto reforzado de 15 cm de espesor. El ancho total del puente es de 12.50 m. La subestructura del puente está formada por un cabezal de concreto sobre el cual se apoyan las traveses. A su vez, los cabezales se apoyan en pilas de concreto reforzado que se desplantan desde una zapata, la cual le transmite las cargas al suelo mediante pilotes. En la figura 1.a se presentan la sección transversal y las dimensiones de los apoyos de neopreno del puente analizado.



c. Vista del puente

Figura 1. Detalles del puente en estudio y de los apoyos de neopreno

El apoyo de neopreno que se estudia consta de cuatro láminas de acero que actúan como refuerzo, tres láminas de neopreno que van intercaladas con las láminas de acero y dos láminas más de neopreno que se colocan en las partes inferior y superior del apoyo. En la tabla 1 se presentan las propiedades de los materiales que se utilizaron para construir el modelo de los apoyos.

Dureza shore	=	60
Módulo de Elasticidad del neopreno	=	4.45 MPa
Deformación mínima de rotura	>	400 %
Módulo de Elasticidad del acero	=	2E+11 MPa
Relación de Poisson del acero	=	0.3

Tabla 1. Propiedades de los materiales para el apoyo de neopreno

3.- ESTUDIO ANALÍTICO

El apoyo de neopreno se modeló mediante elementos finitos. La base del apoyo se restringe en los tres grados de libertad (x, y, z) y la excitación se aplica en su parte superior. Para tomar en cuenta la interacción entre dos superficies (láminas de acero y neopreno), se utilizaron elementos de contacto, los cuales permiten modelar el deslizamiento que se puede presentar entre las superficies. Las condiciones de contacto se definieron como *bonded*, lo cual implica una adhesión entre las superficies de las placas interconectadas [17]. El análisis se realizó bajo carga axial constante y fuerzas laterales correspondientes a señales dinámicas, que correspondieron a sismos registrados en distintos tipos de terreno, señales teóricas y fuerzas que se aplicaron al puente durante pruebas de vibración [18].

El elemento finito considerado para el modelo que se analiza es del tipo prisma rectangular, (ocho nodos y tres grados de libertad por nodo). El neopreno es un material *hiperelástico* y por lo tanto tiene un comportamiento no lineal, lo que significa que su respuesta ante la carga aplicada no es directamente proporcional a la deformación [19]. En la simulación numérica, se consideran dos placas rígidas colocadas tanto en la parte inferior como en la parte superior del apoyo, las cuales representan a la subestructura y a la superestructura respectivamente. Se aplican en la placa superior las cargas, tanto vertical como horizontal. La carga vertical corresponde a la carga que la superestructura del puente descarga sobre la subestructura y la carga horizontal corresponde a las fuerzas bajo las cuales se quieren estudiar los modelos. Se analizan tres diferentes fuerzas horizontales (sismos, señales teóricas y pruebas de vibración). Para los elementos de contacto entre las láminas de acero y de neopreno se aplica la condición "*bonded*", condición que representa la unión entre las láminas por medio del proceso de vulcanizado. Para la unión entre el apoyo con la subestructura y la superestructura se considera también el elemento de contacto "*bonded*" debido a que las superficies del apoyo y el puente quedan adheridos por efecto de la carga vertical que provoca fricción entre los materiales.

3.1 MODELO DEL NEOPRENO

El neopreno al ser un material *hiperelástico* se puede modelar de diferentes formas, destacando el modelo de "Ogden de tercer orden" por ser de los más utilizados en diversos trabajos [13, 14]. La ecuación (1) corresponde a dicho modelo [17, 20].

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=1}^N \frac{\mu_r}{\alpha_r} (\lambda_1^{\alpha_r} \lambda_2^{\alpha_r} \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (1)$$

donde W es la función de energía de deformación, λ_1, λ_2 y λ_3 son las relaciones principales de estiramiento, N, α_r y μ_r son constantes del material.

$$\begin{array}{lll} \mu_1=6.180 \times 10^5 \text{ Pa} & \mu_2=1180 \text{ Pa} & \mu_3=-9810 \text{ Pa} \\ \alpha_1=1.3 & \alpha_2=5 & \alpha_3=-2 \end{array}$$

De acuerdo al diseño de los aisladores sísmicos la deformación permisible a corte [21] se puede estimar como una fracción de la deformación de falla del hule a tensión pura ε_V de acuerdo a las ecuaciones 2 y 3.

$$\gamma_w \approx 0.7 \varepsilon_V \quad (2)$$

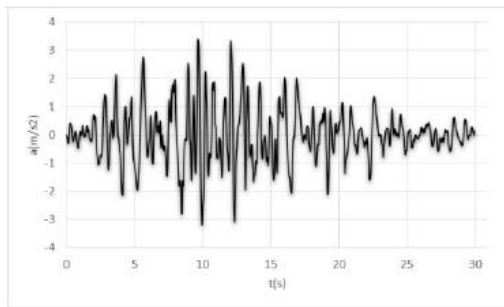
$$\varepsilon_V = e \delta \quad (3)$$

donde γ_w es la deformación permisible a corte, ε_V es la deformación de falla del hule en tensión pura, e es el espesor de las láminas de neopreno y δ es el porcentaje de deformación mínima de rotura.

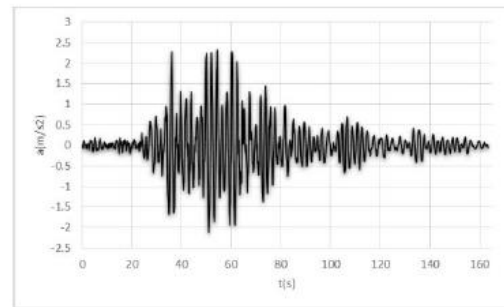
De acuerdo con las características geométricas del apoyo y de acuerdo a las ecuaciones 2 y 3, la deformación permisible a corte es de 12.46 cm, este valor es independiente de la rigidez lateral del apoyo. Durante las pruebas que se realizan en este trabajo, se asumió que dicha deformación era la máxima que podían alcanzar los apoyos que se estudian.

3.2 SEÑALES EMPLEADAS EN LOS ANÁLISIS

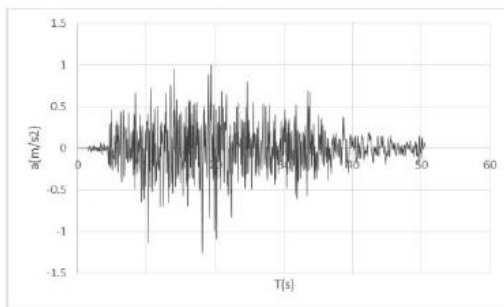
Las señales utilizadas para excitar el modelo representativo de los apoyos de neopreno del puente, corresponden a: a) sismos reales registrados en terreno duro y blando, b) señales teóricas y c) señales obtenidas de pruebas de vibración forzada llevadas a cabo en el puente que se estudia [18]. Por lo que se refiere a las señales sísmicas, se consideraron los registros correspondientes al sismo de Michoacán, México del 19 de Septiembre de 1985 ($M_w=8.1$). En particular, se analizan los registros de las estaciones de Caleta (zona epicentral), Ciudad Universitaria (UNAM) y en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en la Ciudad de México estas dos últimas estaciones. Dichos registros tienen periodos principales de $T=0.5s$ aproximadamente para Caleta y CU y de $T=2s$ para SCT. Por este motivo, se seleccionaron adicionalmente a estos registros sísmicos, dos señales armónicas de amplitud constante y periodos de $T=0.5s$ y $T=2s$, las cuales se supone son representativas del movimiento sísmico del suelo en terreno duro y terreno blando respectivamente. Adicionalmente, se analizan dos señales obtenidas durante pruebas de vibración forzada llevadas a cabo en el puente [18]. Durante estas pruebas se sometió la superestructura del puente a cargas laterales armónicas y se registraron las aceleraciones, tanto en la superestructura como en la subestructura. En la figura 2 se muestran las señales correspondientes a los sismos y a las pruebas de vibración.



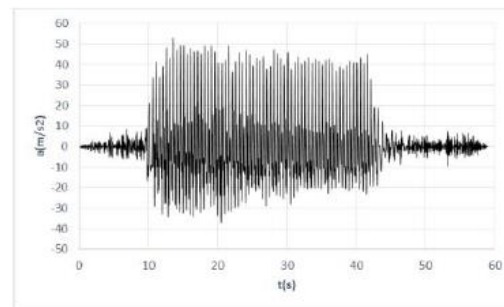
a) Acelerograma estación de CU



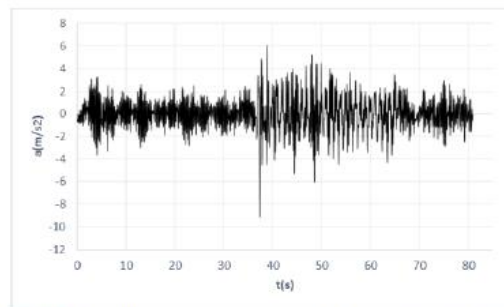
b) Acelerograma estación de SCT



c) Acelerograma estación Caleta



d) Prueba de vibración con periodo de $T = 0.5s$



e) Prueba de vibración con periodo de excitación $T = 1s$

Figura 2. Señales de aceleraciones aplicadas al modelo como excitación

4.- RESULTADOS

4.1 MODELO SOMETIDO AL SISMO DE 1985 REGISTRADO EN LAS ESTACIONES DE CALETA, CU Y SCT

El modelo por elementos finitos del apoyo de neopreno en estudio, se sometió a tres registros sísmicos (Caleta, CU y SCT). En todos los casos el apoyo de neopreno fue llevado hasta la falla (deformación horizontal cercana a 12.46 cm). Para lograr ello, las fuerzas sísmicas se escalaron, de tal forma que la deformación máxima del apoyo fue cercana a 12.46 cm. En este estudio, se utilizan dos parámetros de respuesta para valorar la capacidad de aislamiento del apoyo: 1) el cociente de la aceleración máxima de la respuesta dinámica del apoyo entre la aceleración máxima de la excitación para la fase estable de la vibración A_r/A_e y 2) el cociente de las intensidades de Arias de la respuesta y la excitación I_r/I_e . La intensidad de Arias se calcula a partir de la ecuación (3) y es un parámetro que permite valorar la cantidad de energía que contiene un registro en determinado lapso de tiempo [22].

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad (4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, $a(t)$ es la aceleración de la señal sísmica y t_d es el tiempo total que dura el movimiento.

Nótese que un valor para estos cocientes de aceleración e intensidad de Arias menor a 1, significa que el apoyo funciona como aislador.

Con el propósito de analizar un mayor número de casos para cada registro de aceleraciones, se realizaron modificaciones a la rigidez del modelo original de tal forma que alcanzaran distintos periodos de vibración. En la tabla 2 se muestran los cocientes de aceleración e intensidad de Arias para los diferentes modelos sometidos a los registros de CALETA, CU y SCT del sismo de 1985.

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ae			Ir/Ie		
			Caleta	CU	SCT	Caleta	CU	SCT
1	-80%	3.04	0.83	1.03	1.29	0.69	1.07	1.42
2	-70%	1.91	0.80	0.90	1.51	0.68	1.23	2.15
3	-60%	1.41	0.81	0.95	1.96	0.76	1.12	4.00
4	-40%	0.93	0.80	1.25	1.68	0.86	1.64	4.50
5	-20%	0.70	0.88	1.30	0.87	0.78	2.31	0.84
6	Original	0.56	0.90	1.33	0.62	0.85	2.61	0.35
7	+20%	0.44	1.06	1.34	0.64	0.99	2.97	0.25
8	+40%	0.40	1.00	1.63	0.55	1.02	2.10	0.18
9	+60%	0.35	1.03	1.72	0.60	1.19	1.98	0.15

Tabla 2. Cocientes de aceleración e Intensidad de Arias para los sismos de CALETA, CU y SCT

4.2 MODELO SOMETIDO A LAS SEÑALES TEÓRICAS CON PERIODOS DE T=0.5s Y T=2s

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el modelo por elementos finitos del apoyo de neopreno sometido a excitaciones senoidales con periodos de $T=0.5s$ y $T=2s$ y amplitudes de 300,000 N y 86,000 N, respectivamente. Bajo estos parámetros se alcanzan desplazamientos máximos de los apoyos de neopreno del orden de 12.35cm y 12.33cm para cada señal. Al igual que en el caso anterior, se realizan cambios en la rigidez del modelo original obteniendo diferentes periodos de vibración, para los cuales se determinan los cocientes de aceleración máxima e intensidad de Arias, los cuales se muestran en la tabla 3.

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ae		Ir/Ie	
			Teórica T=0.5s	Teórica T=2s	Teórica T=0.5s	Teórica T=2s
1	-80%	3.04	1.11	1.02	1.05	0.83
2	-70%	1.91	1.03	1.06	0.82	1.12
3	-60%	1.41	1.03	1.13	0.93	1.27
4	-40%	0.93	1.05	1.35	1.01	1.79
5	-20%	0.70	1.09	1.66	1.13	2.84
6	Original	0.56	1.18	2.26	1.32	5.39
7	+20%	0.44	1.30	2.51	1.59	4.91
8	+40%	0.40	1.37	2.46	1.91	2.96
9	+60%	0.35	1.57	2.27	2.50	1.09

Tabla 3. Cocientes de aceleración e Intensidad de Arias para las señales teóricas de T=0.5s y T=2s

4.3 MODELO SOMETIDO A LAS SEÑALES DE PRUEBAS DE VIBRACIÓN CON PERIODOS DE EXCITACIÓN DE T=0.5s Y T=1s

Al igual que en los casos anteriores, se escalaron los registros de tal forma que se alcanzaran durante los análisis desplazamientos máximos cercanos al permisible. Para el caso del modelo original se obtuvieron desplazamientos de 12.30 cm y 12.45 cm respectivamente para cada señal. Así mismo, se analizaron diferentes valores de rigidez lateral del modelo. En la tabla 4 se muestran los resultados del análisis correspondiente a los cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias (respuesta entre excitación).

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ac		Ir/Ic	
			Prueba T=0.5s	Prueba T=1s	Prueba T=0.5s	Prueba T=1s
1	-80%	3.04	0.69	0.70	0.71	0.80
2	-70%	1.91	0.63	0.66	0.56	0.73
3	-60%	1.41	0.65	0.70	0.62	0.74
4	-40%	0.93	0.66	0.81	0.64	0.84
5	-20%	0.70	0.69	0.92	0.68	0.97
6	Original	0.56	0.71	0.98	0.74	0.93
7	+20%	0.44	0.75	0.99	0.85	0.96
8	+40%	0.40	0.80	0.98	0.97	0.97
9	+60%	0.35	0.88	0.87	0.93	0.96

Tabla 4. Cocientes de aceleración e Intensidad de Arias para las pruebas experimentales de T=0.5s y T=1s

4.4 RESULTADOS DE HISTÉRESIS

Adicionalmente, se muestran las curvas de histéresis para dos señales teóricas de amplitud creciente con periodos de $T=0.5s$ y $T=2s$ respectivamente. Las dos señales teóricas cuentan con 30 ciclos cada una. El análisis que se presenta, sólo considera algunos ciclos del comportamiento histerético del modelo, en particular, se consideran ciclos que corresponden a distintos niveles de deformación del apoyo que van desde pequeñas deformaciones, hasta deformaciones cercanas a la falla. A partir de este análisis, se evalúan el desplazamiento, la rigidez horizontal efectiva, el amortiguamiento y la energía disipada del modelo.

La rigidez efectiva se define como [14]

$$K_{efec}^h = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n}} \quad (4)$$

donde, $F_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de la fuerza de corte, $F_{m\acute{i}n}$ es el valor mínimo de la fuerza de corte, $d_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de desplazamiento, $d_{m\acute{i}n}$ es el valor mínimo de desplazamiento.

La relación de amortiguamiento viscoso se obtiene a partir de la ecuación (5), la cual depende de la energía contenida en el lazo de histéresis W_d y de la energía elástica W_s .

$$\beta = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad (5)$$

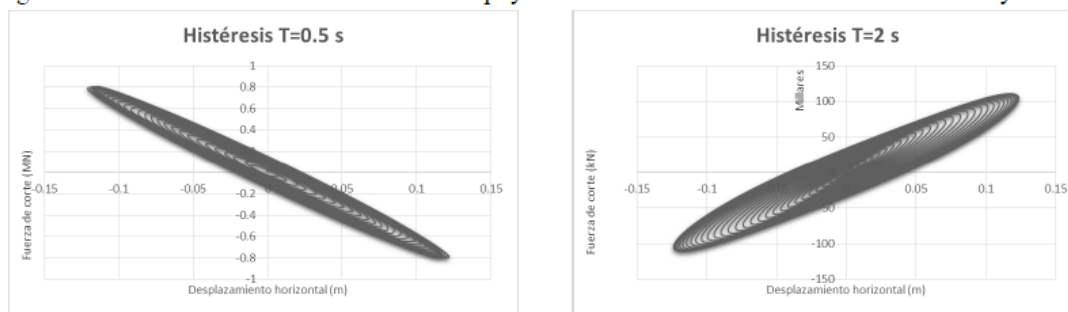
$$W_s = \frac{K_{efec}^h (\Delta_{m\acute{a}x})^2}{2} \quad (6)$$

$\Delta_{m\acute{a}x}$ es el promedio de los desplazamientos máximo y mínimo

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{d_{m\acute{a}x} + |d_{m\acute{i}n}|}{2} \quad (7)$$

4.4.1 Histéresis del apoyo sometido a las señales teóricas de T=0.5 s y T=2.0 s

Los ciclos de histéresis son una forma de medir la energía disipada por el apoyo de neopreno, el área encerrada en cada lazo de histéresis representa la energía disipada por el apoyo en cada ciclo. En la figura 3 se muestran las gráficas de los ciclos de histéresis cuando el apoyo es sometido a las señales teóricas de T=0.5s y T=2s



a) Fuerza vs desplazamiento para T=0.5s

b) Fuerza vs desplazamiento para T=2s

Figura 3. Curvas de histéresis para las señales con T=0.5s y T=2s

La energía histérica total que disipa el apoyo de neopreno corresponde a la suma de la energía histérica de cada uno de los 30 ciclos de que consta cada señal. En este caso, se calculó la energía histérica para 4 ciclos que se consideran representativos del conjunto. En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para cuatro ciclos, correspondientes a las señales de T=0.5s y T=2s. De izquierda a derecha se muestran el desplazamiento del apoyo para cada ciclo, la rigidez horizontal efectiva, la energía disipada por el apoyo en cada ciclo de histéresis y el amortiguamiento para cada ciclo.

Propiedades del apoyo de neopreno sometido a la señal teórica de T=0.5 s			
Desplazamiento (cm)	Rigidez horizontal efectiva (N/m)	Energía disipada (W_d) (J)	Amortiguamiento (β) (%)
5.5	6449255.83	9433.6	7.59
8.7	6967324.80	17632.83	5.21
11.3	6748652.18	29863.86	5.51
12.1	6514593.09	31372.80	5.23
Propiedades del apoyo de neopreno sometido a la señal teórica de T=2 s			
Desplazamiento (cm)	Rigidez horizontal efectiva (N/m)	Energía disipada (W_d) (J)	Amortiguamiento (β) (%)
3.7	1167044.59	898.62	8.49
7.5	1038068.48	3329.25	8.98
10.85	932743.07	7730.11	11.18
12.35	896176.15	9540	11.09

Tabla 5. Propiedades histéricas del apoyo de neopreno

5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas a los diferentes modelos se clasificaron de acuerdo al tipo de excitación empleada, en sísmos, señales teóricas y señales de pruebas de vibración. Los cocientes de la respuesta del modelo dividida entre la excitación empleada, ya sea para las máximas aceleraciones durante la fase estable de la vibración, o de las intensidades de Arias, se presentan en las tablas 2, 3 y 4 de la sección anterior. Valores de estos cocientes menores a la unidad indican que existe una reducción en la respuesta del modelo en relación a la excitación,

por lo que se puede considerar que el apoyo trabaja en cierta manera como aislador. Por el contrario, valores mayores a la unidad para dichos cocientes (máximas aceleraciones e intensidades de Arias) muestran que los apoyos no trabajan como aisladores, ya que se amplifica su respuesta.

En la figura 4 se muestran las gráficas que relacionan los cocientes de aceleración y los cocientes de intensidades de Arias para los distintos modelos analizados. Se presentan los resultados para todos los tipos de excitación ensayadas (sismos, señales teóricas y pruebas de vibración).

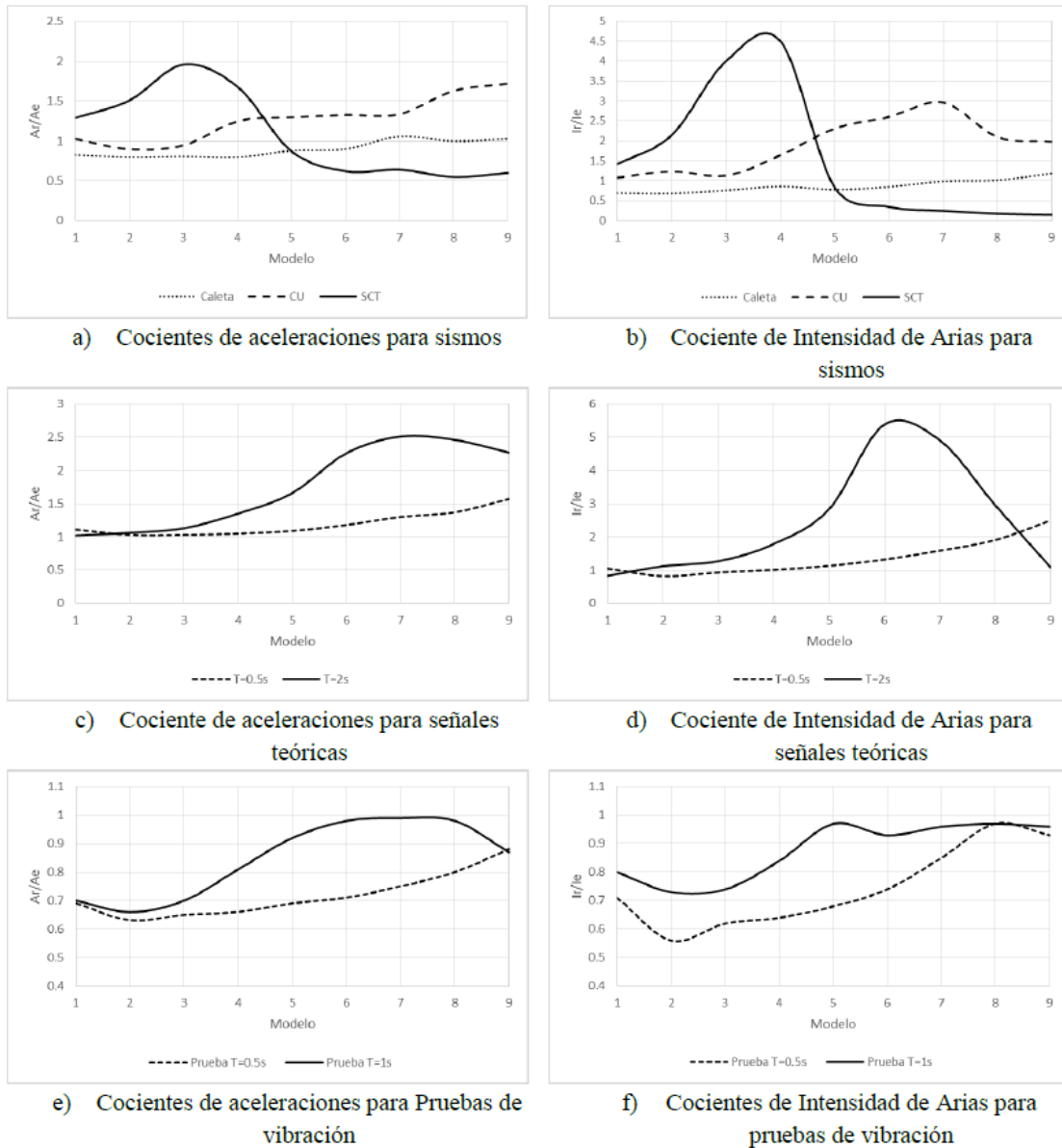


Figura 4. Cocientes de aceleración e Intensidad de Arias de todas las señales empleadas

En el caso de los sismos (figuras 4a y 4b) se observa que los modelos del apoyo tienen un mejor comportamiento cuando se emplea como excitación el registro sísmico de Caleta, el cual corresponde a un sitio de terreno duro localizado cerca del epicentro del temblor. Se aprecia en este caso que la mayoría de los modelos tienen un comportamiento como aislador sísmico (cocientes menores a 1). Esta condición se observa, tanto para los cocientes de máximas aceleraciones, como para los cocientes de las intensidades de Arias. Por lo que se refiere a los modelos en los que se utilizó como excitación el registro obtenido en la estación SCT, el cual es un sitio de terreno blando localizado a más de 400 km del epicentro del temblor, se observa que sólo los últimos cinco modelos actúan como aisladores. Por su parte, en los modelos sometidos al registro de CU (sitio de terreno duro localizado a la misma distancia epicentral que SCT) se observa que sólo dos modelos se comportan como aisladores.

Cuando los modelos se someten a las señales teóricas senoidales se observa que prácticamente en ningún caso el apoyo se comporta como aislador reduciendo la respuesta. En el caso de los modelos sometidos a las excitaciones utilizadas en las pruebas de vibración, se aprecia que todos los modelos funcionan como aisladores sísmicos.

6.- CONCLUSIONES

El estudio se centró en el análisis por elementos finitos de un apoyo de neopreno para un puente simplemente apoyado. El apoyo de neopreno se analizó bajo distintos tipos de señales dinámicas que se aplicaron como fuerzas laterales unidireccionales. Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

- El modelo con las características geométricas originales tiene comportamiento como aislador sísmico, sólo para los registros de Caleta y SCT. Para el caso de Caleta se alcanza una reducción de la respuesta de hasta 10%, mientras que para SCT, la disminución de la respuesta puede llegar a ser hasta 38%. Para el registro de CU no hay aislamiento debido a que el periodo de vibración del modelo y el periodo del registro son muy similares; por lo que hay un acoplamiento de los periodos que amplifican la respuesta.
- Para los modelos geométricos con rigidez modificada, sometidos al registro sísmico de Caleta, se observa que solo funcionan como aisladores los modelos que tienen una reducción de la rigidez, que va del 20% al 80%, llegándose a tener disminuciones de la respuesta cercanas al 17%. Cuando se aumenta su rigidez, en ninguno de los modelos se aprecia que haya alguna disminución de la respuesta. Por el contrario, se aprecian ampliaciones de la respuesta que pueden ser de hasta 3%.
- Para el caso de los modelos modificados sometidos al sismo de CU, ninguno funciona como aislador. Caso contrario es el de los modelos sometidos al sismo de SCT, ya que desde el modelo con reducción del 20%, hasta el modelo con aumento de rigidez del 60%, se aprecia que si funcionan como aisladores sísmicos. En este caso se observan reducciones de la respuesta que llegan a ser de hasta 40%.
- Cuando el apoyo de neopreno se somete a las señales teóricas senoidales, se observa que ninguno de los modelos tiene una reducción en la respuesta. La máxima amplificación de la respuesta es de 127% y se presenta para la señal con $T=2$ s.
- Cuando el apoyo se somete a las excitaciones empleadas en las pruebas de vibración, se observa que todos los modelos analizados funcionan como aisladores sísmicos. En este caso las reducciones en la respuesta son considerables y se encuentran entre el 12% y el 37%.
- En relación a las curvas de histéresis, se observó que el aislador disipa energía, sin embargo, la cantidad de energía disipada con la señal teórica de 2 s es mínima en comparación con la señal de periodo de 0.5 s. La diferencia entre las energías disipadas es del 410%.

- Se observó que el amortiguamiento del apoyo sometido a la señal teórica de 2 s es de 11.09 %, mientras que para el apoyo sometido a la señal de 0.5 s es de 5.23 %. Se aprecia que el modelo se degrada más para el caso donde se analiza la excitación con periodo de 0.5 s.
- En síntesis, la estrategia que se debe seguir para dimensionar los apoyos convencionales de neopreno de un puente, radica en proporcionarles la rigidez horizontal adecuada; con el propósito de buscar que el periodo fundamental del puente se salga de la zona en que se encuentran los periodos principales de la excitación. Ello con el propósito de evitar el acoplamiento de periodos de la estructura con los de la excitación. Para terreno blando, se aprecia que la zona en que deseablemente se debe encontrar el periodo fundamental de los puentes, tiene como límite superior un periodo igual a 0.7 s. A su vez, para sitios de terreno duro, se puede señalar como zona deseable aquella que tiene como límite inferior un periodo de 1.5 s.

7. - REFERENCIAS

- [1] M.-Kelly J. "Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators". *JSEE*, 1999. Vol.2-1 p.19-34.
- [2] Byung-Young M., Gyung-Ju K., Beom-Soo K. et al. "Design and Manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation". *Journal of Material Processing Technology*, 2002, Vol.130-131 p.145-150. DOI 10.1016/S0924-0136(02)00713-6
- [3] Gyung-Ju K., Beom-Soo K.Kang. "Dynamic analysis of fiber-reinforced elastomeric isolation structures". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, Vol.23 p.1132-1141. DOI 10.1007/s12206-008-1214-y
- [4] Valdés-González J., De la Colina-Martínez J., Díaz-Camacho S.A. "Evaluación experimental de la capacidad de aislamiento de los dispositivos de apoyo de un puente vehicular". *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 2010 p.1-17.
- [5] Sánchez J., Masroor A., Mosqueda G., et al. "Static and dynamic stability of elastomeric bearings for seismic protection of structures". *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2013. Vol.139 p.1149-1159. DOI 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000660
- [6] Strauss A., Apostolidi E., Zimmermann T., et al. "Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient". *Engineering Structures*, 2014. Vol.75 p.402-413. DOI 10.1016/j.engstruct.2014.06.008
- [7] Hedayati-Dezfuli F. and Shahria-Alam M. "Performance of carbon fiber-reinforced elastomeric isolators manufactured in a simplified process: experimental investigations". *Structural Control and Health Monitoring*, 2014. Vol.21 p.1347-1359. DOI 10.1002/stc.1653
- [8] Toopchi-Nezhad H., J.-Tait M. and G.-Drysdale R. "Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: Finite element analysis". *Composite Structures*, 2011. Vol.9 p.850-859. DOI 10.1016/j.compstruct.2010.07.009
- [9] M.-Osgoeei P., J.-Tait M., Konstantinidis D. "Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolator (FREIs) under lateral loading in different directions". *Composite Structures*, 2014. Vol.113 p.164-173. DOI 10.1016/j.compstruct.2014.02.033
- [10] Van-Engelen N.C., M.-Osgoeei P., J.-Tait M. et al. "Experimental and finite element study on the compression properties of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)". *Engineering Structures*, 2014. Vol.74 p.52-64. DOI 10.1016/j.engstruct.2014.04.046
- [11] Spizzuoco M., Calabrese A. and Serino G. "Innovative Low-Cost recycled rubber-fiber reinforced isolator: Experimental test and finite element analysis". *Engineering Structures*, 2014. Vol. 76 p.99-111. DOI 10.1016/j.engstruct.2014.07.001
- [12] Osgoeei M.P., Van Engelen N.C., Dimitrios Konstantinidis and Michael T. "Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)". *Engineering Structures*, 2015. Vol. 85, p.293-303. DOI 10.1016/j.engstruct.2014.11.037
- [13] Mordini A. and Strauss A. "An innovative earthquake isolation system using fibre reinforced rubber bearings". *Engineering Structures*, 2008 Vol. 30, p.2739-2751. DOI 10.1016/j.engstruct.2008.03.010
- [14] Das A., Dutta A. and Deb S. K. "Performance of fiber-reinforced elastomeric base isolators under cyclic excitation". *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, DOI: 10.1002/stc.1668
- [15] Chen W. F. and Duan L. *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press. 2000, 26.1-26.12. ISBN: 9781420049596
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. *Bearings, Section 14*, 2007, Washington D.C.
- [17] ANSYS © Workbench™ (2013). *User's manual, revision 15.0*". Swanson Analysis System Inc.

- [18] Valdés-González J., De la Colina-Martínez J., González-Pérez C. A. "Pruebas dinámicas para determinar el nivel de aislamiento sísmico de los apoyos de neopreno de un puente vehicular". *XX Congreso de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2015.*
- [19] García-R. M, Ruíz-S O y López C. *Technical Report Hyperelastic Material Modeling*. Colombia: Laboratorio CAD/CAM/CAE, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad EAFIT, 2005, Medellín.
- [20] Ray W O. *Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids*. *Royal Society of London*. 1972, Vol. 326, 565-584 p. DOI 10.1098/rspa.1972.0026
- [21] Jara Díaz M, Jara Guerrero J M y Casas Rius J R. *Protección sísmica de estructuras con dispositivos de control*. México: Autor, 2006, 304 p. ISBN 970-703-445-3
- [22] Villaverde R. *Fundamental Concepts of earthquake engineering*. United States of America: CRC Press, Taylor Francis and Group , 2009. 960 p. ISBN: 978142006495