

INFLUENCIA DE LOS TOPES SÍSMICOS EN LA RESPUESTA TRANSVERSAL DE PUENTES CONTINUOS

Samuel Montuar V. ¹, Manuel Jara D. ²

RESUMEN

Como resultado de la pérdida de la longitud de asiento de la superestructura de los puentes, que se ha observado con frecuencia en sismos recientes, se ha propuesto el uso de topes sísmicos para prevenir el desplazamiento transversal del tablero. Además de los problemas de diseño de los topes, que en algunos casos no se han detallado adecuadamente, no se ha estudiado de manera integral el impacto que tienen estos elementos en la respuesta sísmica global del sistema. Los topes actúan como elementos con un comportamiento no lineal que debe incorporarse en el análisis, junto con las otras fuentes de no linealidad que existen en los puentes. En este trabajo se realiza un estudio del impacto de los topes sísmicos en puentes regulares e irregulares y se analiza su influencia en la distribución de elementos mecánicos, capacidad de disipar energía del sistema y en los desplazamientos del tablero.

Palabras clave: Puentes, análisis sísmico, efectos no lineales, pérdida de asiento, topes sísmicos.

ABSTRACT

Because of the large longitudinal or transverse movements during strong ground motions, loss of superstructure support and span collapse has been observed in recent

earthquakes. Transverse shear keys is an appealing alternative to reduce these excessive lateral displacements. Nevertheless, the analysis and design of these elements are poorly conceived, and the non-linear effects are not well incorporated in the analysis model. This paper aims to assess the influence of the transverse shear keys in the global seismic response, of regular and irregular bridges.

Keywords: Bridges, seismic analysis, non-linear effects, seat loss, shear keys.

INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos que se emplean en la actualidad para estudiar el comportamiento sísmico de puentes no logran representar adecuadamente la respuesta real de una estructura. El mayor conocimiento que se tiene sobre el comportamiento de los materiales sometidos a cargas dinámicas elevadas, así como el uso de mejores herramientas para el análisis estructural, permiten cerrar la brecha existente entre los modelos numéricos y las respuesta reales de un sistema. Sin embargo, la posibilidad de aplicar de forma incorrecta los modelos numéricos ha crecido junto con el mayor conocimiento. Así es el caso de las no linealidades que se presentan en los puentes durante los movimientos sísmicos y que en muchas ocasiones no se representan adecuadamente, o se omiten en el modelo numérico. Las principales fuentes de no linealidad ocurren en los apoyos, las juntas de dilatación, los topes sísmicos, los accesos y las pilas. En la figura 1 se muestran estas no linealidades.

En este trabajo se estudia el impacto que tienen los topes sísmicos en la respuesta sísmica global de un puente. Para ello se analizan cuatro modelos de puentes, con distintos tipos de apoyo y distribución de la rigidez lateral de las pilas.

¹ División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Email: samknd_@hotmail.com

² Email: mjarad10@gmail.com

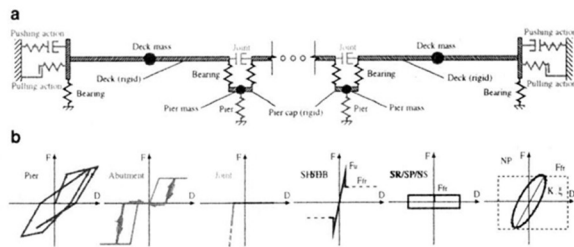


Figura 1. Zonas de los puentes en las que se presentan comportamientos no lineales (Andreas J. et. al, 2012)

CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

Para evaluar el efecto de los toques sísmicos sobre el comportamiento sísmico de un puente se estudia un puente regular y un puente irregular. Para cada puente se consideran dos tipos de apoyo por lo que se cuenta con cuatro modelos de análisis. Se consideraron apoyos de neopreno en las pilas intermedias de todos los modelos; apoyos articulados en los modelos 1 y 3; y apoyos de neopreno en los modelos 2 y 4.

El esfuerzo a la compresión simple ($f'c$) para el cajón y las pilas es de 300 kg/cm^2 y el módulo de elasticidad (E) de $14000\sqrt{f'c}$. Para el análisis modal a la masa de la estructura se le adicionó la masa debida al peso del asfalto y del parapeto, para lo cual se consideró un espesor de asfalto de 14 cm. El peso correspondiente se aplicó como una presión sobre toda la superficie del tablero de 0.308 t/m^2 .

El puente prototipo tiene cuatro claros de 40m de longitud y una longitud total de 160 m (ver figura 2).

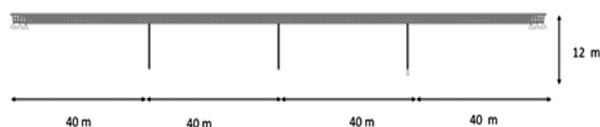


Figura 2. Geometría de los puentes regulares.

Las pilas tienen una sección transversal circular hueca con un diámetro exterior de 2 m y un diámetro interno de 1.4m. Las pilas se modelaron como elementos tipo "frame" divididas en longitudes de un décimo de la altura. El tablero es una sección cajón con un ancho de 10 m en la parte superior y 7 m en la losa inferior. El peralte total es de 1.8 m, con un espesor de almas de 0.3 m. La sección de la losa y los diafragmas transversales se representaron con 2 880 elementos Shell (ver figura 3).

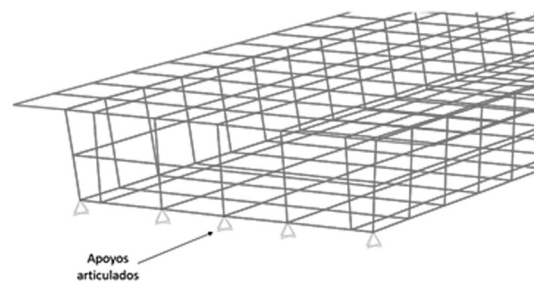


Figura 3. Modelo de la sección cajón

Se aseguró que la masa modal efectiva incluida en el modelo fuera mayor al 80% de la masa total de la estructura en cada dirección de análisis. En el modelo 1, que corresponde al puente regular con apoyos articulados en los extremos, el primer modo corresponde a un movimiento transversal, con un periodo de 0.97 s y un factor de participación de masa de 69% (la configuración deformada se muestra en la figura 4). El segundo modo es vertical, con un periodo de 0.54s y un elevado factor de participación de masa de 68%. El primer modo longitudinal es el modo 8, con un periodo de 0.32 s y factor de participación de masa de sólo 11%. La restricción longitudinal que ofrecen los apoyos articulados, restan importancia al movimiento longitudinal del puente, provocando una mayor interacción entre el estribo y el terreno, que en este modelo se consideró como restringido (roca).

El segundo modelo tiene las mismas características del modelo 1, pero con apoyos de neopreno tanto en pilas como en estribos. Todos los apoyos cuentan con un espesor total de 4.1 cm y sólo cambia la geometría en planta como resultado de las distintas cargas verticales que se transmiten en los estribos y



Figura 4. Primer modo del puente regular con apoyos articulados en los estribos

pilas. Como resultado de la flexibilidad de los apoyos en ambas direcciones horizontales, la configuración del primer modo cambia a una rotación alrededor del eje vertical (figura 5), con un periodo de 1.65 s y participación de masa de 97%.



Figura 5. Primer modo del puente regular con apoyos de neopreno en los estribos

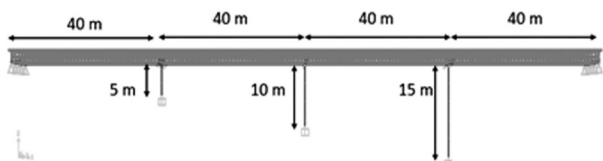


Figura 6. Geometría de los dos puentes irregulares

Los puentes irregulares tienen la misma superestructura, pero con pilas de 5 m, 10 m y 15 m de altura (figura 6). El modelo 3 tiene apoyos articulados en los extremos y apoyos de neopreno en las pilas.

Al igual que en el modelo 1, el modo fundamental es dirección transversal con un periodo de 0.71 s (figura 7). El factor de participación de masa en esta dirección es de 71%.



Figura 7. Primer modo del puente irregular con apoyos articulados en los estribos

El modelo 4 tiene apoyos de neopreno en estribos y pilas y presenta una configuración para el primer modo de rotación alrededor del eje vertical acoplada con el movimiento transversal (figura 8), con un periodo fundamental de 1.77 s. El segundo modo tiene un periodo de 1.08 s y su configuración es en dirección transversal con un factor participación de masa de 80.5%.



Figura 8. Primer modo del puente irregular con apoyos de neopreno en los extremos

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Ciclos histeréticos

Se realizó un análisis no lineal en el tiempo, considerando el criterio de plasticidad concentrada. Para evaluar la respuesta de las pilas se utilizó el ciclo histerético de Takeda (figura 9), derivado de la curva momento rotación de las pilas. El ciclo histerético de Takeda queda definido por la siguiente expresión:

$$k_u = k_o * \mu^{-\alpha}$$

donde:

k_o = Rigidez efectiva en el punto de fluencia

μ =Nivel de ductilidad

k_u =Rigidez resultante de la descarga.

El nivel de ductilidad es:

$$\mu = \frac{d_y}{d_f}$$

donde:

d_y = Deformación máxima esperada

d_f = Deformación en el punto de fluencia.

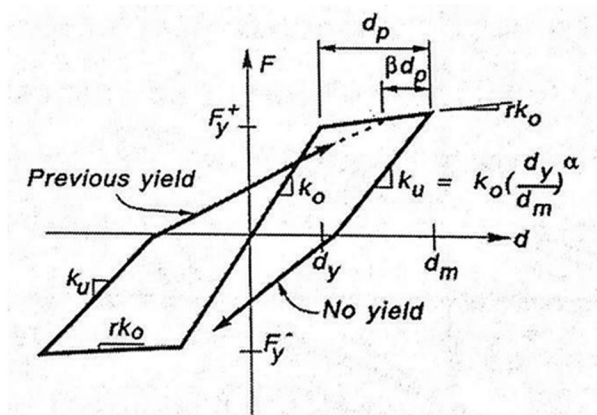


Figura 9.-Ciclo histerético de Takeda para las pilas

Los topes sísmicos tienen como propósito evitar los desplazamientos excesivos en dirección transversal y/o longitudinal del tablero (figura 10).

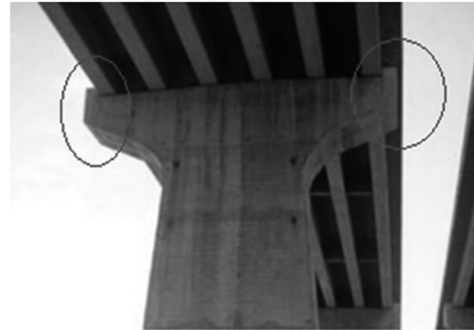


Figura 10.-Tope sísmico transversal en un puente de claros simplemente apoyados

Los topes se colocan sobre los cabezales de las pilas con una separación que generalmente está comprendida entre 0 y 5 cm con respecto a la pared de la viga transversal. Los topes sísmicos empiezan a trabajar cuando se presentan desplazamientos transversales y la abertura entre la superestructura y el tope se cierra. En ese momento ambos elementos entran en contacto lo cual modifica las características de rigidez de un valor cero, cuando la separación entre la superestructura y el tope permanece abierta, alcanzando una rigidez importante cuando se cierran. En la siguiente figura 11 se muestra la relación fuerza desplazamiento típica de estos elementos. La gráfica indica que los desplazamientos pueden ocurrir en ambos sentidos del tablero.

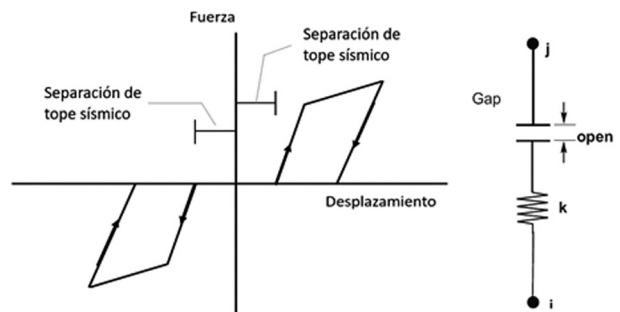


Figura 11.-Ciclo histerético y elemento link para representar a los topes sísmicos

Demanda sísmica

Para el análisis se emplearon once registros obtenidos de la base de sismos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la tabla 1 se muestran los once registros. Las aceleraciones máximas del terreno varían de 0.72 m/s² (registro de Zacatula 21/09/ 1985) hasta 3.98 m/s² (registro de Jamiltepec). En la figura 12 se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones y de los epicentros de los sismos.

Tabla 1.- Registros utilizados para el análisis en la historia del tiempo.

Nombre de la estación	Sismo registrado	Aceleración máxima (m/s ²)	Abreviatura
Aeropuerto Zihuatanejo	19/09/1985	1.53	AZIH
Aeropuerto Zihuatanejo	21/09/1985	1.58	AZIH
Caleta de Campos	19/09/1985	1.4	CALE
Chila de las Flores	15/06/1999	1.04	CHFL
Ciudad Serdan	15/06/1999	1.99	CSER
Jamiltepec	30/09/1999	3.98	JAMI
La Union	19/09/1985	1.65	UNIO
La Union	21/09/1985	0.76	UNIO
Manzanillo	21/01/2003	3.87	MANZ
Zacatula	19/09/1985	2.62	ZACA
Zacatula	21/09/1985	0.72	ZACA



Figura 12.- Localización de las estaciones y epicentros de los sismos

Antes de realizar el análisis en la historia del tiempo se realizó una corrección de la línea base y filtrado de datos con el programa "Seismosignal". Los espectros de respuesta de los registros corregidos se muestran en la figura 13, en donde se observa que los picos se concentran en la región de periodos bajos como corresponde a eventos registrados en terreno firme.

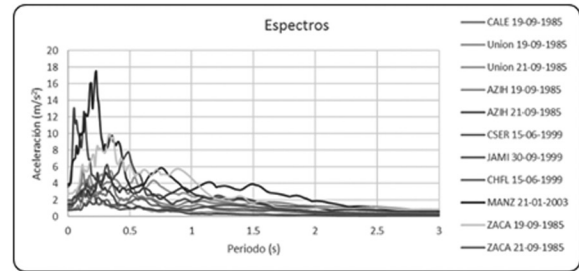


Figura 13.- Espectros de respuesta de los once registros

Se consideraron cuatro distintas condiciones para el análisis de cada modelo. La primera consiste en el puente originalmente descrito sin considerar topes sísmicos. Las otras tres opciones son con topes sísmicos con una separación de 0, 2.5 y 5 cm entre el tope y la pared del cajón. De esta manera se realizaron 16 modelos, bajo once distintos registros sísmicos, lo que da un total de 176 análisis para cada nivel de intensidad sísmica. La intensidad sísmica se fue escalando de manera que se alcanzaran los estados límite de fluencia, pérdida de recubrimiento y falla de la pila.

Estados límite

Los estados límite de las pilas se definieron de acuerdo con la propuesta de Kowalsky (2000), según la cual, los estados límite de fluencia, pérdida del recubrimiento y falla del elemento están asociados a los valores de deformación del concreto y del acero que se muestran en el diagrama momento curvatura de la figura 14. Con los valores de rotación y de de-

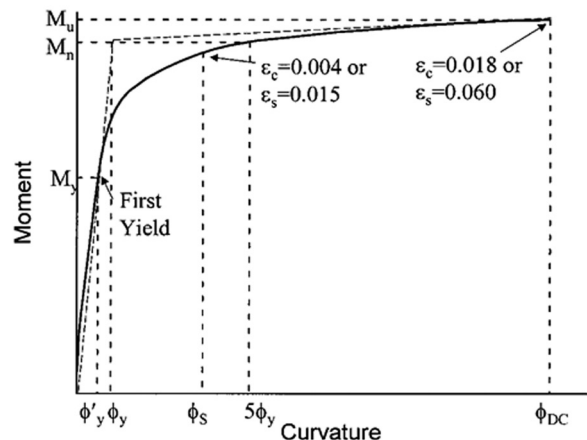


Figura 14. Definición de estados límite a partir de un análisis momento-curvatura

formación correspondiente que se obtienen en cada uno de los análisis se verifica si se alcanza el estado límite en cuestión.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cada uno de los cuatro modelos, con cada una de las cuatro condiciones para los topes sísmicos, fue sometido a los once registros con distintos niveles de intensidad sísmica. Los resultados se presentan mediante curvas de intensidad sísmica espectral (eje vertical) contra el nivel de daño (eje horizontal), representado en este caso mediante la ductilidad de rotación de la articulación plástica correspondiente a la pila más dañada. La ductilidad de rotación se obtuvo en la base de la pila y se define mediante la siguiente expresión:

donde:

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_{\max}^{\pm}}{\theta_y}$$

μ_{θ} = Ductilidad de rotación

θ_y = Rotación correspondiente a la fluencia

θ_{\max}^{\pm} = Rotación máxima alcanzada en cualquiera de los dos sentidos.

En la figura 15 se presentan los resultados para el puente regular con apoyos fijos en los estribos y sin topes transversales. Las tres líneas verticales representan los estados límite de fluencia, pérdida de recubrimiento y falla del elemento. La ductilidad de

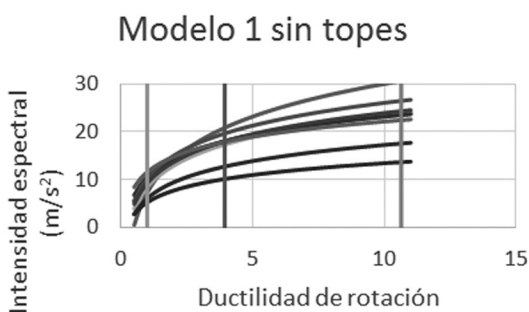


Figura 15. Curvas de intensidad espectral vs ductilidad de rotación para el modelo 1, sin topes sísmicos y para los once registros sísmicos

rotación para los tres estados límite en estas pilas corresponde a ductilidades de 1, 4 y 11 aproximadamente.

Las mismas curvas se obtuvieron para el modelo 1 con topes a una separación de 0, 2.5 y 5 cm. En vista de la dispersión de los resultados, se obtuvieron las curvas promedio, promedio más una desviación estándar y promedio menos una desviación estándar, en todos los casos. Por motivos de espacio se muestra a continuación la respuesta del modelo 1 únicamente para las curvas promedio del puente sin topes y con topes a 0 y 2.5 cm de separación de la pared vertical del cajón. La línea discontinua que se observa en la parte inferior de la figura 16 representa el puente con topes a una separación de 2.5 cm. Su posición en la parte inferior indica que los estados límite se producen con menores valores de intensidad sísmica que en el caso del puente con topes pegados al cajón (línea continua) y del puente sin topes (línea discontinua superior). Es decir, que el efecto de los topes transversales, si bien contribuye a reducir los desplazamientos transversales del puente, nos lleva a una concentración de fuerzas en las pilas.

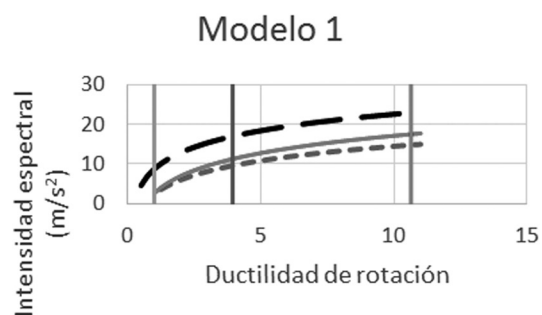


Figura 16.- Curvas de intensidad espectral vs ductilidad de rotación promedio para el modelo 1, sin topes sísmicos y con topes separados 0 y 2.5 cm

La influencia del tope en la ductilidad de rotación de la pila central, se observa en la siguiente figura. Es evidente que la presencia del tope incrementa de manera significativa la demanda en esta pila. Las otras dos pilas también experimentan un incremento en la demanda de rotación, sin embargo, el impacto es menor que el que se observa en la pila central.

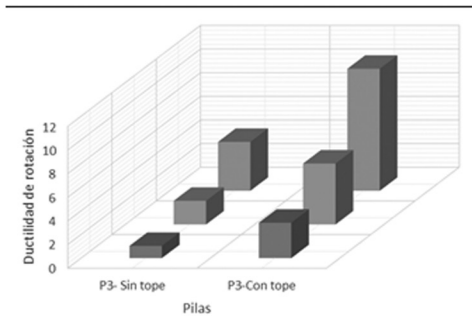


Figura 17.- Efecto del tope sísmico en la demanda de rotación de la pila central del modelo 1

En la figura 17 se concentran los resultados que se obtuvieron para los cuatro modelos y para las tres alternativas de separación de los topes sísmicos. Se muestran los valores de intensidad espectral en el eje vertical cuando se alcanza la fluencia en las pilas de cada uno de los modelos. Se observa en el modelo 1 que el caso más desfavorable corresponde a los topes con una separación de 2.5 cm (barra ubicada al fondo de la gráfica), y que el mejor comportamiento, desde el punto de vista de las pilas, se presenta cuando no existen topes (barra al frente de la gráfica). Sin embargo, en el caso del modelo 2, el comportamiento es exactamente el opuesto. Cuando no hay topes, la demanda en las pilas es más elevada (barra al frente), y se alcanza la fluencia de las pilas si se colocan topes (barras al fondo). Lo mismo puede asegurarse para el modelo 4. Sin embargo, en el caso del modelo 3 las barras indican una intensidad sísmica semejante para alcanzar la fluencia con las tres disposiciones de topes sísmicos.

Al incrementarse la intensidad sísmica, el comportamiento del puente se modifica como resultado de la distinta pérdida de rigidez de los elementos verticales. Como resultado de la distinta distribución de rigidez, la pérdida de recubrimiento de las pilas, tiene una distribución distinta a la que se obtuvo para el inicio de la fluencia, tal y como se observa en la figura 18. Se observa en la figura que los topes sísmicos tienen un efecto favorable sobre este nivel de comportamiento en los modelos 2 a 4, ya que se requiere una menor intensidad sísmica para provocar

la pérdida de recubrimiento en las pilas cuando no hay tope o cuando se omite su presencia en el análisis. Lo anterior significa que la omisión del tope en los análisis de los tres modelos que se mencionan, resulta conservador. Por el contrario, en el modelo 1, la falta de tope sísmico, o su omisión en el análisis, conduce a una mayor intensidad sísmica para que las pilas pierdan el recubrimiento. Se observa que el tope con una separación de 2.5 cm exige la mayor demanda de rotación en la pila y la lleva a la pérdida de recubrimiento para una intensidad sísmica menor. Las figuras 19 y 20 muestran los resultados que se producen al llegar a la falla de los elementos, de acuerdo con el criterio propuesto por Kowalsky, que se ilustra en la figura 14. Tanto en esta figura, como en las dos anteriores, se observa que la presencia de topes transversales con una separación de 2.5 cm, mejora la respuesta en el modelo 3, que representa al puente irregular, con apoyos articulados en los estribos. También puede afirmarse que en el modelo 1, correspondiente al puente regular con apoyos articulados, la mejor respuesta se obtiene cuando no existen topes, y el comportamiento más desfavorable es cuando hay topes con una holgura de 2.5 cm. Finalmente, los modelos 2 y 4 que representan al dos puentes con apoyos de neopreno en los estribos, la presencia de los topes también es favorable, desde el punto de vista de la demanda de rotación de las pilas. No obstante, la mejora tiene un impacto reducido. Las diferencias de comportamiento de los cuatro modelos puede explicarse por la distinta distribución inicial y posterior redistribución de las demandas en las pilas, situación que se refleja claramente en los desplazamientos de tablero.

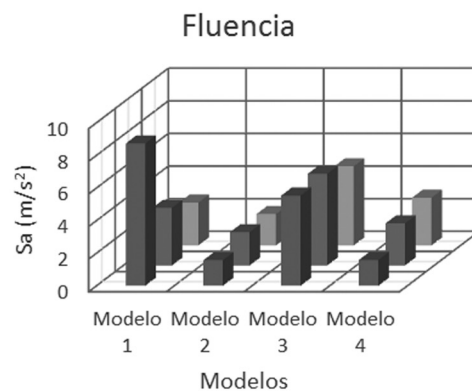


Figura 18.- Efecto de los topes en la primera fluencia de las pilas de los cuatro modelos

Pérdida de recubrimiento

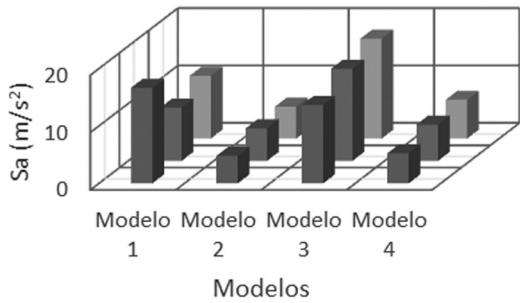


Figura 19. Efecto de los topes en la pérdida del recubrimiento de las pilas de los cuatro modelos

Colapso

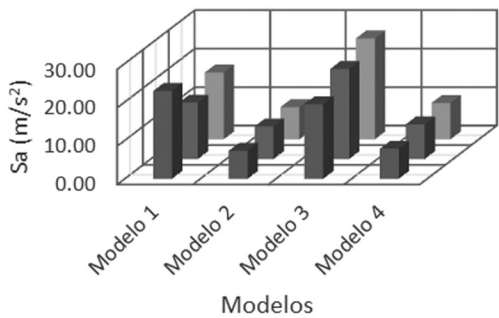


Figura 20. Efecto de los topes en la falla de las pilas de los cuatro modelos

Modelo 2

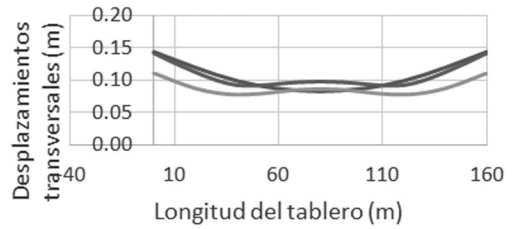


Figura 21. Efecto de los topes en el desplazamiento del tablero del modelo 2

Modelo 3

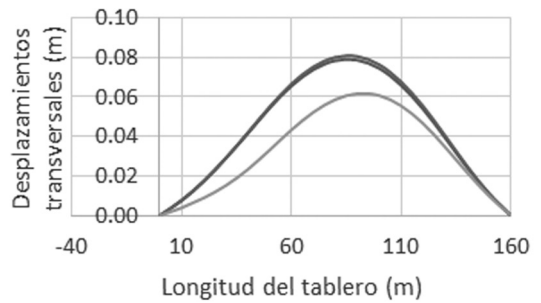


Figura 22. Efecto de los topes en el desplazamiento del tablero del modelo 3

Modelo 4

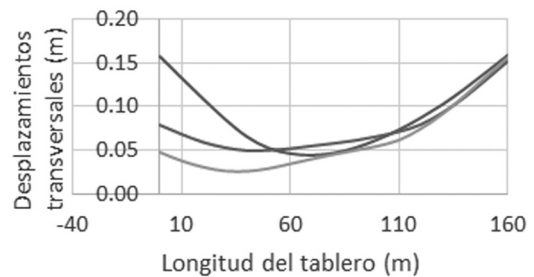


Figura 23. Efecto de los topes en el desplazamiento del tablero del modelo 4

Las figuras 21 a 23 muestran los desplazamientos del tablero de los modelos 2 a 4, para el puente sin topes, con topes separados a 0 y 2.5 cm de la pared vertical del cajón. Las configuraciones deformadas de cada modelo corresponden al mismo nivel de intensidad sísmica, independientemente de la existencia o posición del tope. En las tres figuras se observa claramente un cambio en la configuración deformada, que explica las distintas demandas de cada pila y el efecto de los topes en la distribución de la demanda. Como es de esperarse las configuraciones que muestran los desplazamiento máximos absolutos en cada figura son los del modelo que no tiene topes transversales.

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

Los grandes desplazamientos longitudinales y transversales que experimentan los tableros de los puentes, durante un gran sismo, ha conducido a la necesidad de colocar topes transversales y/o longitudinales para evitar el desfase del eje del puente, la pérdida de asiento, e incluso la caída de algún tramo de la estructura, tal y como se ha observado en sismos ocurridos en distintas partes del mundo.

A pesar de su importancia, el impacto de los topes en el comportamiento sísmico global del puente, no siempre se estima de manera apropiada. Por tal motivo, en este trabajo se estudia la influencia de estos elementos en la demanda sísmica sobre las pilas, en puentes regulares e irregulares.

La presencia de los topes transversales tiene un impacto considerable en la respuesta global de una estructura. La demanda de rotación en las articulaciones plásticas que se forman en las pilas se modifica como resultado de la inclusión de los topes.

En el puente regular con apoyos articulados en los estribos, la presencia de topes incrementa la demanda de rotación en las pilas. Si no se deja una separación entre el tope y la pared vertical del cajón, el efecto negativo del tope es mayor.

En el puente regular con apoyos de neopreno en pilas y estribos, los topes cumplen su función de reducir los desplazamientos transversales y también reducen la demanda de rotación sobre las pilas.

En los puentes irregulares la presencia de topes también reduce la demanda de rotación en las pilas debido a una redistribución favorable de las rigideces de los elementos verticales que tienden a reducir las diferencias relativas de rigidez entre los ejes de apoyos.

Si se colocan topes en el puente pero se omite su presencia en los modelos de análisis, las demandas de rotación en las pilas se subestiman en el puente regular, y son conservadoras en los puentes irregulares y en el puente con apoyos de neopreno.

Es necesario incluir en los modelos de análisis los topes para lograr una mejor estimación de las demandas en las pilas. En este trabajo no se considera la pérdida de rigidez que llega a producirse cuando el tope sufre daños y que se recomienda como complemento del estudio que aquí se presenta.

ACI 341.2R. (2003), Análisis y diseño sísmico de puentes de concreto, IMCYC. ISBN 968-464-171-6, pp.35.

Andreas J., Saiid M., Nuray M. y Tatjana I. (2012), *Seismic Design and Assessment of Bridges*, Springer. New York. pp. 233.

Changfeng W., Long Z. y Xingchong C. (2014), Effect of non-linearity of restrainer and supports on the elasto-plastic seismic response of continuous girder bridge. *Frattura ed Integrità Strutturale*, pp. 486-494.

Kowalsky, Mervin (2000), Deformation limit states for circular reinforced concrete bridge columns, *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, No. 8, ASCE, ISSN 0733-9445/00/0008-0869-0878.