



ID: XXXVIIIJSIE-07-001

## EVALUACIÓN SÍSMICA DE APOYOS ELASTOMÉRICOS EN PUENTES CONSIDERANDO CONDICIONES DE SITIO

### SEISMIC ASSESSMENT OF ELASTOMERIC BRIDGE BEARINGS CONSIDERING SITE CONDITIONS

Carolina Castaño Agudelo (P) (1); Carlos Alberto Riveros-Jerez (2); Alvaro Viviescas (3)

- (1) Estudiante de Maestría, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Medellín, Colombia.  
(2) Dr. Prof., Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Medellín, Colombia.  
(3) Dr. Prof., Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, Santander, Colombia.  
Dirección para correspondencia: carolina.castanoa@udea.edu.co; (P) Presentador

**Área Temática:** Diseño Estructural puentes.

#### Resumen

Los apoyos elastómeros reforzados son los elementos de conexión entre la superestructura y la subestructura más utilizados debido a su bajo costo en comparación con otros sistemas disponibles. Sin embargo, los requisitos de diseño en la normatividad colombiana consideran exclusivamente las cargas verticales muertas y vivas en el diseño de estos apoyos sin presentar requisitos adicionales para evaluar su desempeño sísmico. Cuando ocurre un sismo de magnitud considerable, existen altas demandas de desplazamientos laterales en los apoyos elastómeros reforzados. Esta situación se vuelve más crítica cuando las condiciones del sitio, como las que se encuentran en Bogotá, conducen a la amplificación sísmica. Esta investigación compara la Norma Colombiana de Diseño de Puentes -CCP 14- AASTHO y el Eurocódigo para analizar los requisitos y procesos de diseño de cada norma para este tipo de apoyos. Se utiliza un modelo de elementos finitos (FE) de un puente de vigas cajón de hormigón con cuatro vanos y una longitud total de 160 m para realizar el análisis comparativo. El modelo de apoyo en estribo de resorte implementado en el modelo FE considera un escenario más realista para analizar la respuesta sísmica del apoyo elastómero reforzado. Los resultados muestran que se obtienen mayores desplazamientos para los apoyos elastómeros reforzados diseñados por CCP 14 – AASTHO que los apoyos diseñados por el Eurocódigo.

*Palabras-clave:* Apoyo elastomérico, Desempeño Sísmico, CCP 14, Eurocode.

#### Abstract

Elastomeric bearings are the most used connection elements between the superstructure and the substructure due to their low cost compared to other available systems. However, the design requirements in the Colombian regulations exclusively consider dead and live vertical loads in the design of elastomeric bearings without presenting additional requirements for evaluating their seismic performance. When an earthquake of considerable magnitude occurs, there are high demands for lateral displacements in the elastomeric bearings, this situation becomes more critical when site conditions such as the ones found in Bogotá lead to seismic amplification. This research compares the Colombian Bridge Design Standard -CCP 14- AASTHO and the Eurocode to analyze each regulation's requirements and design processes for elastomeric bearings. A finite element (FE) model of a concrete box girder bridge with four spans and a total length of 160 m is used to conduct the comparative analysis. The spring abutment model implemented in the FE model considers a more realistic scenario to analyze the elastomeric bearing seismic response. The results show that larger displacements are obtained for the elastomeric bearings designed by CCP 14 – AASTHO than the elastomeric bearings designed by the Eurocode.

*Keywords:* Bridge, Elastomeric Bearing, Rubber bearing, seismic design, CCP 14, Eurocode.



## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia existen aproximadamente 2100 puentes de los cuales el 38% posee elementos de conexión tipo apoyos elastómeros (Muñoz & Valbuena, 2007). Este tipo de conexiones se utilizan en el ámbito colombiano debido a su disponibilidad y economía, comparados con los otros tipos de conexiones que deben ser solicitados bajo pedido y con tiempos de entrega extensos, debido a que son compañías extranjeras las que los fabrican. A nivel mundial estos dispositivos han sido utilizados por más de 50 años, debido a que son rentables, de fácil fabricación, poseen una combinación de alta rigidez en la dirección vertical, así como flexibilidad rotacional y horizontal, además de que suelen tener un mejor comportamiento frente a terremotos que los apoyos tradicionales (Mohamedmeki, Esmail, & Ajeel, 2021), (Wei, Yuan, Igarashi, Zhu, & Tan, 2021), (Aria & Akbari, 2013), (Al-Anany, Moustafa, & Tait, 2018), (Lee & Lee, 2020) y (Strauss, Apostolidi, Zimmermann, Gerhafer, & Dritsos, 2014). Esta tipología de apoyo está concebida para soportar movimientos horizontales y verticales absorbiendo la traslación de la superestructura mediante cizallamiento (Brockenbrough, 2009). Según la CCP 14 (INVIAS, 2014) las cargas verticales son soportadas por compresión del caucho y los movimientos - rotaciones por deformación. La norma CCP 14 (INVIAS, 2014) proporciona métodos para diseñar los cojinetes elastómeros, estos procedimientos tienen en cuenta requisitos de cargas en servicio sin impacto, traslación, rotación y gradientes de temperatura a los que estará sometido el conjunto de elementos durante sus condiciones de servicio. La CCP 14 (INVIAS, 2014) en su artículo 14.6.5.3 especifica que *El diseño de los apoyos debe ser consistente con la respuesta de todo el sistema del puente ante el evento sísmico u otro evento extremo bajo consideración*. Lo que deja en evidencia, como la norma exige un comportamiento sísmico adecuado, a pesar de que el método de diseño propuesto en esta no considera dichas cargas en el proceso.

En la CCP 14 se requiere que la deformación a cortante del apoyo elastómero para condiciones de servicio no exceda el 50% de la altura de las capas de elastómero (14.7.5.3.2 de la CCP 14), con el fin de evitar el vuelco en los bordes y la delaminación debido a la fatiga. No obstante, la capacidad de deformación estática no debe compararse con las demandas sísmicas, y es posible describir, como la mayoría de los códigos de diseño solo cuantifican claramente los estados de daño permisibles para las columnas, y dejan de lado estas especificaciones para los demás elementos del puente (Zhang & Alam, 2019). En esta misma dirección, en la CCP 14 se exige que el elastómero se fije cuando las fuerzas laterales en servicio excedan una quinta parte de la máxima carga muerta vertical de diseño, al considerar un factor de fricción entre elastómero-concreto de  $\mu=0.20$  (C14.8.3.1 de la CCP 14). Sin embargo, las restricciones descritas anteriormente se deben únicamente a las fuerzas y deformaciones inducidas por las cargas verticales en servicio, no obstante, debido a que los puentes de carretera constituyen las partes más críticas de las redes de transporte, se deben diseñar para garantizar su adecuado funcionamiento durante sismos, es decir cargas mayoradas o en estados límites (Wei et al., 2021). Estados que no son considerados actualmente en la norma de diseño CCP-14 (INVIAS, 2014) que a su vez se basa en la norma americana AASHTO (AASHTO, 2012), es por ello por lo que se pretende revisar el proceso actual de la normativa por medio de la comparación de procedimientos de diseño de otras normativas como el Eurocódigo, normativa que si considera requisitos para el adecuado desempeño de estos dispositivos ante eventos sísmicos y cargas mayoradas.



## 2. METODOLOGIA

El proceso de modelación se basa en lo presentado por (Siami Kaleybar & Tehrani, 2021). Se elige este artículo como punto de partida para las modelaciones debido a su configuración de superestructuras en viga cajón, usada actualmente en el contexto nacional. Así, se modelan dos puentes tipo viga cajón con una longitud total de 160 m, en los cuales se variará la longitud de las columnas de los apoyos intermedios. Según lo anterior, se modelan 4 tipos de puentes diferentes los cuales se basan en el trabajo presentado por Kaleybar et al (Siami Kaleybar & Tehrani, 2021). Para estas 2 tipologías de puentes se organizarán las condiciones de contorno asociadas a cada una de las dimensiones de elastómeros obtenidas al diseñar los mismos por la normativa de la CCP 14 y el Eurocódigo. Los perfiles de las configuraciones generales de los puentes modelados son presentados en la Tabla 1. La superestructura es una viga cajón de tres celdas con un ancho de aletas superior de 9.6 m y profundidad de 2.4 m. Las columnas de los apoyos intermedios poseen una sección transversal circular con diámetro de 2.5 m.

Tabla 1. Configuración de puentes modelados.

Configuración 1	<p style="text-align: center;">L=40m      L=40m      L=40m      L=40m</p> <p style="text-align: center;">H=14m      H=14m      H=14m</p>
Configuración 2	<p style="text-align: center;">L=40m      L=40m      L=40m      L=40m</p> <p style="text-align: center;">H=21m      H=7m      H=21m</p>

### 2.1. Condiciones de contorno

Para esta modelación se trabaja con el modelo “Spring Abutment” o estribo resorte presentado de (Aviram, Mackie, & Stojadinovic, 2008), esto debido a que considera el aporte del estribo a la rigidez global del sistema del puente. Se considera que antes del cierre del GAP, la fuerza de la superestructura es transmitida a través de los apoyos elastoméricos al espaldar, a continuación, a los pilotes y posteriormente al lleno, en un sistema en serie, y después del cierre del GAP, el resto de la fuerza de la superestructura es resistida por la presión pasiva del lleno tras el espaldar. Con el fin de validar las condiciones de la modelación y su concordancia con el artículo original, en la Tabla 2 se presenta en la los valores de periodos fundamentales obtenidos de la modelación y se comparan con los presentados por (Siami Kaleybar & Tehrani, 2021), donde se concluye que las modelaciones realizadas se acercan en gran medida a los periodos obtenidos por el autor de referencia.



Tabla 2. Verificación de periodos

Configuración 1 - Recta				
Modo N°	Kaleybar and Tehrani			Autor
	OpenSees (seg)	CSI Bridge (seg)	MSBridge (seg)	Midas Civil (seg)
1	1.578 s	1.591 s	1.584 s	1.579 s
2	1.225 s	1.238 s	1.231 s	1.380 s
3	1.137 s	1.147 s	1.142 s	1.369 s

## 2.2. Análisis tiempo historia

Para el análisis de los puentes en estudio se elige aplicar un análisis tiempo historia, con base en los modelos de los puentes se concluye que los periodos fundamentales de los puentes varían de 1.16 seg a 1.65 seg. Así, los espectros elegidos deberán igualar o exceder el espectro de respuesta objetivo en el rango de período de 1.15 segundos a 1.65 segundos. Igualmente, se escalan los espectros de tal manera que el espectro de respuesta promedio de los registros coincida con el espectro objetivo en el rango de período requerido con un error muy pequeño. Los espectros de respuesta de los movimientos del suelo escalados se basan en el espectro de diseño de las disposiciones de CCP 14 (INVIAS, 2014) que corresponde al 7% de probabilidad de superación en 75 años. Los acelerogramas se escalan en el programa SeismoMatch (Seismosoft, 2010). Se supone que los puentes están ubicados en la ciudad de Bogotá con suelo tipo C (es decir, con velocidad de onda de corte, VS, en el rango de 360 a 760 m/s) y tipo D (es decir, con velocidad de onda de corte, VS, en el rango de 180 a 360 m/s). Respecto a la modelación, se aplicaron simultáneamente en las direcciones longitudinal y transversal de los puentes las dos componentes horizontales perpendiculares de los registros sísmicos (Siami Kaleybar & Tehrani, 2021). Cabe señalar que el efecto del ángulo de incidencia sísmica no se consideró en esta investigación y estuvo fuera del alcance de este estudio. Sin embargo, la investigación ha demostrado que el ángulo de incidencia del terremoto puede influir en la respuesta sísmica, particularmente en los puentes irregulares y curvos. En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan los tipos de acelerogramas utilizados en la modelación.

Tabla 3. Características acelerogramas sin escalar

Nombre	Condición	Mw	PGA (g)	Duración (seg)
Loma Prieta	Campo Cercano	6.93	0.644	39.98
México	Campo Frontal	7.20	0.039	129.99
México 1985	Campo Lejano	7.20	0.039	85.32

Tabla 4. Acelerogramas utilizados

Nombre	Condición	Tipo de suelo	Abreviación
Loma Prieta	Campo Cercano	C	C.L.P-C
Loma Prieta	Campo Cercano	D	C.L.P-D
México	Campo Frontal	C	F.M-C
México	Campo Frontal	D	F.M-D
México 1985	Campo Lejano	C	L.M-C
México 1985	Campo Lejano	D	L.M-D



### 2.3. Diseño de elastómeros

En la Tabla 5 se presenta el resumen de las dimensiones de los elastómeros diseñados.

Tabla 5. Resumen dimensiones elastómeros

Configuración		CCP 14			Eurocodigo		
Puente	Angulo	Base	Ancho	Alto	Base	Ancho	Alto
1	Recto	500 mm	500 mm	160 mm	700 mm	700 mm	136 mm
2	Recto	500 mm	500 mm	160 mm	700 mm	700 mm	136 mm
3	Recto	600 mm	600 mm	200 mm	700 mm	800 mm	157 mm
4	Recto	600 mm	600 mm	183 mm	700 mm	800 mm	136 mm

Es posible concluir que el método de diseño del Eurocódigo genera elastómeros de mayores dimensiones en planta y con menores alturas que el diseño por la CCP 14 (INVIAS, 2014). Esto genera elastómeros más estables y menos susceptibles a fallas por giros.

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS

Se plantea el diseño de los apoyos elastómeros por la norma colombiana y punto de interés debido a que se observan falencias y el Eurocódigo como norma que podría llegar a ser aportante para complementar el proceso de diseño presente en la primera. De las modelaciones descritas se obtienen los resultados de desplazamientos en 3 puntos específicos, los puntos relevantes consideran las zonas de estribos (Nodo 100 y Nodo 260) y la zona de conexión de la columna central con la superestructura en la dirección “X” (Nodo 180). En la Fig. 1 y Fig. 2 se presentan los desplazamientos obtenidos en los puntos de interés del puente en la configuración 1.

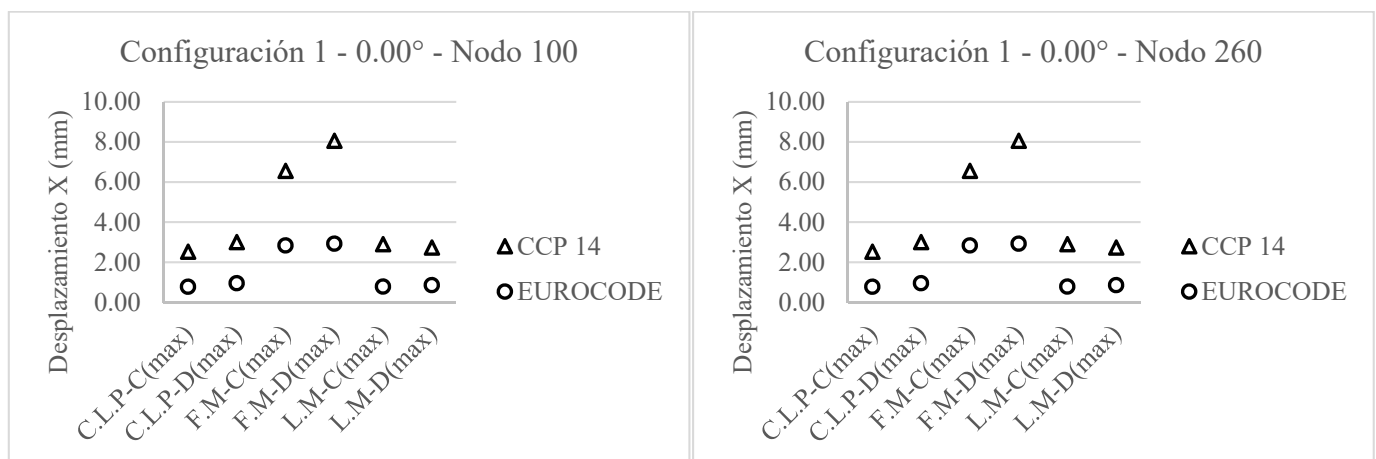


Fig. 1. Desplazamientos en X - Nodo 100 y 260 - Configuración 1

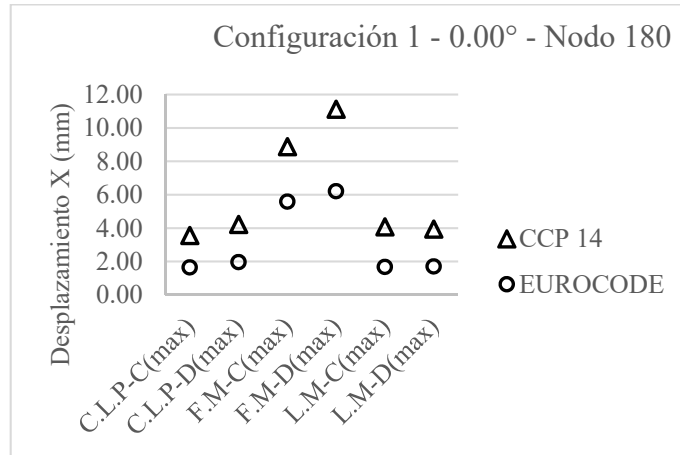


Fig. 2. Desplazamientos en X - Nodo 180 - Configuración 1

Considerando el punto de interés principal - Comportamiento sísmico de los elastómeros diseñados bajo las normativas elegidas – CCP 14 y Eurocódigo - se concluye como se generan mayores desplazamientos para los elastómeros diseñados por la CCP 14 que, para el diseñado por el Eurocódigo, con rangos de variación entre el 37% y 73%. Asimismo, es posible observar como el acelerograma de campo frontal produce los mayores desplazamientos del grupo de acelerogramas elegidos, los rangos de variación son de 3.30 a 5.14 mm para el acelerograma frontal y de 1.75 a 2.41 mm para los casos cercanos y lejanos, siendo el acelerogramas de campo frontal y para tipo de suelo “D” el que presenta las mayores diferencias. Por lo que se confirma lo descrito en (Cheshmehkaboodi & Guizani, 2021), en el que los autores describen como en los suelos blandos las respuestas sísmicas se amplifican (Caso de Bogotá) y por ende concluyen lo relevante de considerar los efectos del suelo en el análisis de los puentes. Adicionalmente, es posible definir como los mayores desplazamientos para esta configuración se presentan en los estribos, con rangos de variación del 57% al 73%, con respecto al apoyo central en el cual las variaciones son del 37% al 59%. En la Fig. 3 y Fig. 4 se presentan los desplazamientos en la configuración 2.

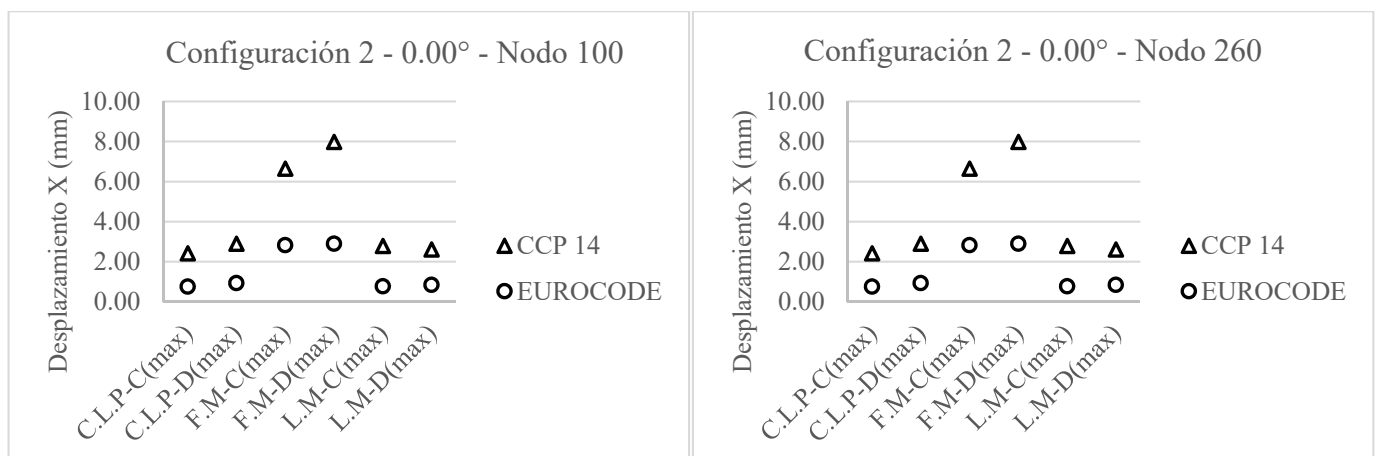


Fig. 3. Desplazamientos en X - Nodo 100 y 260 - Configuración 2

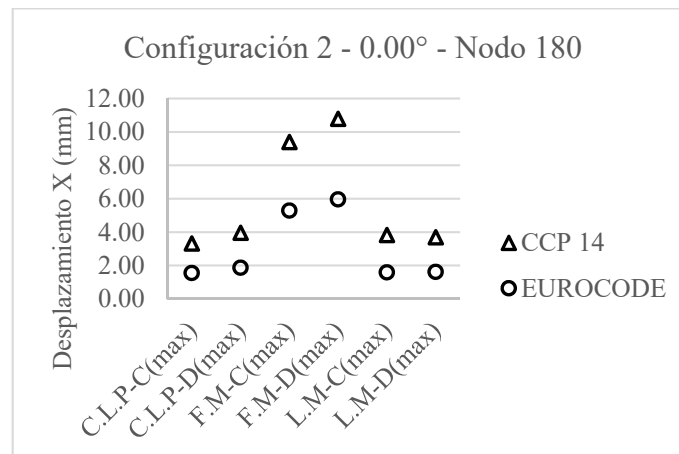


Fig. 4. Desplazamientos en X - Nodo 180 - Configuración 2

Para esta configuración, se mantiene la tendencia descrita y detallada en la configuración anterior, es decir, respecto a los desplazamientos de los elastómeros al comparar los procedimientos de diseño, nuevamente los elastómeros diseñados por la CCP 14 (INVIAS, 2014) presentan mayores desplazamientos, respecto a los desplazamientos obtenidos para el Eurocódigo con variaciones del 44% al 72%. De nuevo para esta configuración, los rangos de variación son de 3.82 a 5.08 mm para el acelerograma frontal y de 1.66 a 2.25 mm para los casos cercanos y lejanos, siendo el acelerogramas de campo frontal y para tipo de suelo “D” el que presenta las mayores diferencias, con lo que se confirma como el sismo frontal es el más relevante para esta configuración. Y finalmente los desplazamientos en estribos presentan variaciones del 58% al 72% y en el apoyo intermedio del 44% al 59%, de nuevo los estribos son los más afectados por los desplazamientos sísmicos, confirmando lo descrito en el párrafo anterior.

#### 4. CONCLUSIONES

Los elastómeros diseñados por la CCP 14, presentan mayores desplazamientos sísmicos que los diseñados por el Eurocódigo, con lo que se concluye que este último código produce elastómeros con mejor desempeño sísmico. Adicionalmente, de los resultados, los mayores desplazamientos se obtuvieron para el sismo de campo frontal. Por lo que se confirma que en suelos blandos las respuestas sísmicas se amplifican (Caso de Bogotá). Finalmente, el mejor comportamiento de los elastómeros diseñados por el Eurocódigo, debido a que se generan menores desplazamientos en los elastómeros diseñados, modelados y analizados por esta normativa. Los menores desplazamientos están asociados a que por esta metodología se obtienen elastómeros con mayores dimensiones en planta y menores alturas al compararse con los diseñados por la CCP 14 (INVIAS, 2014), lo anterior genera elastómeros más estables.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la orientación recibida del profesor Payam Tehrani de la Universidad de Tecnología Amirkabir de Irán durante la calibración del modelo numérico. Igualmente, el apoyo recibido del grupo INME de la Universidad Industrial de Santander.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS (2012), Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials

Al-Anany, Y. M., Moustafa, M. A., & Tait, M. J. (2018). Modeling and evaluation of a seismically isolated bridge using unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators. *Earthquake Spectra*, 34(1), 145–168. <https://doi.org/10.1193/072416EQS118M>

Aria, M., & Akbari, R. (2013). Inspection, condition evaluation and replacement of elastomeric bearings in road bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(9), 918–934. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.638171>

Aviram, A., Mackie, K. R., & Stojadinovic, B. (2008). Effect of abutment modeling on the seismic response of bridge structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7(4), 395–402. <https://doi.org/10.1007/s11803-008-1008-3>

Brockenbrough, R. L. (2009). Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure. In *Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure* (Third Edit). The McGraw-Hill Companies, Inc. Retrieved from <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071597630/chapter/chapter4>

Cheshmehkaboodi, N., & Guizani, L. (2021). On the influence of earthquakes and soil characteristics on seismic response and performance of isolated bridges. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06451-6>

INVIAS. (2014). *Norma colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP 14*. (A. C. de I. Sismica, Ed.).

Lee, D. J., & Lee, D. J. (2020). Expansion joints. In *Bridge Bearings and Expansion Joints* (pp. 60–83). <https://doi.org/10.1201/9781482266993-9>

Mohamedmeki, Z. M., Esmail, F. J., & Ajeel, E. A. (2021). Fatigue life analysis of laminated elastomeric bearing pad. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.328>

Muñoz, E., & Valbuena, E. (2007). Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia. *Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 4(40), 125–140.

Seismosoft. (2010). SeismoMatch.

Siami Kaleybar, R., & Tehrani, P. (2021). Investigating seismic behavior of horizontally curved RC bridges with different types of irregularity in comparison with equivalent straight bridges. *Structures*, 33(February), 2570–2586. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.014>

Strauss, A., Apostolidi, E., Zimmermann, T., Gerhaher, U., & Dritsos, S. (2014). Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient. *Engineering Structures*, 75, 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.008>

Wei, W., Yuan, Y., Igarashi, A., Zhu, H., & Tan, P. (2021). Experimental investigation and seismic fragility analysis of isolated highway bridges considering the coupled effects of pier height and elastomeric bearings. *Engineering Structures*, 233(January), 111926. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111926>

Zhang, Q., & Alam, M. S. (2019). Performance-based seismic design of bridges: a global perspective and critical review of past, present and future directions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(4), 539–554. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1558269>