



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

cpc@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión
Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Candebat-Sánchez, Darío

ALGUNAS REFLEXIONES ACERCA DE LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL
SISMORRESISTENTE DE PUENTES

Ciencia en su PC, núm. 3, julio-septiembre, 2016, pp. 22-41

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Santiago de Cuba, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181349355003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

ALGUNAS REFLEXIONES ACERCA DE LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL SISMORRESISTENTE DE PUENTES

SOME REFLECTIONS ABOUT THE STRUCTURAL SEISMIC BRIDGES RETROFIT

Autor:

Darío Candebat-Sánchez, dario@cenais.cu. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais). Teléfonos: 641112. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Los puentes han sido afectados considerablemente por sismos fuertes ocurridos en diversas partes del mundo. Muchas de estas estructuras han tenido que ser rehabilitadas con el objetivo de mejorar su comportamiento ante acciones sísmicas. En este trabajo se presenta un análisis teórico de los aspectos que inciden directamente en la rehabilitación estructural sismorresistente de puentes. Se definen los parámetros que deben ser tenidos en cuenta para seleccionar y priorizar las estructuras que se van a rehabilitar, evaluar la vulnerabilidad sísmica estructural y seleccionar las estrategias de rehabilitación más adecuadas. En el análisis se parte de valorar la contribución realizada por diferentes autores y regulaciones internacionales, con el objetivo de sustentar teóricamente un procedimiento para la rehabilitación estructural sismorresistente en Cuba.

Palabras clave: puentes, vulnerabilidad, procedimiento, rehabilitación, sismorresistente.

ABSTRACT

Bridges have been damaged by strong earthquakes in different parts over the world. Many structures have been retrofitted in order to improve its seismic behavior. A theoretical analysis of the aspects directly related with seismic retrofit of bridges is presented. Parameters useful for preliminary assessment and prioritizing the structures to be retrofitted, for assessing its seismic vulnerability and for selecting retrofit strategies are defined. This analysis is based in scientific contributions of different international authors and regulations and the main objective is to support theoretically a Cuban procedure for seismic retrofit of bridges.

Key words: bridges, vulnerability, procedure, rehabilitation, seismic.

INTRODUCCIÓN

Durante la ocurrencia de eventos sísmicos fuertes, como los sobrevenidos en Los Ángeles, Estados Unidos, 1994; Kobe, Japón, 1995; Chi Chi, Taiwan, 1999; Chile, 2010; Filipinas, 2013, muchos puentes de hormigón colapsaron o resultaron dañados; lo cual provocó pérdidas materiales y humanas y afectó considerablemente las redes viales y, consecuentemente, la transportación (Figura 1).



Figura 1. Puentes dañados durante terremotos fuertes. a) Grieta diagonal por cortante en pila de hormigón poco reforzada, puente Wu shu, Taichung. b) Colapso de tramos, puente Shi wei, Taichung (Buckle, Friedland, Mander, Martin, Nutt and Power; 2006). c) Caída de tramos.

Teniendo en cuenta el comportamiento que han manifestado estas estructuras ante acciones sísmicas fuertes, en Santiago de Cuba se han realizado investigaciones para evaluar la vulnerabilidad sísmica estructural de puentes de carreteras. Morejón, Candebat, Ferrera, Márquez, Arango, Zapata, Chuy y Díaz (2006) demuestran que el 64.0 % de los puentes ubicados en la red vial de interés nacional de la provincia posee una vulnerabilidad entre moderada y alta. Igualmente, Torres (2009), en su estudio de los puentes de la autopista nacional, confirma que la tipología cubano-italiana, creada para dar respuesta a la construcción de obras de fábrica en zonas sísmicas, tiene características asociadas a su diseño que la hacen vulnerable ante la acción sísmica.

Posteriormente, Candebat, Godínez y Caballero (2012) y Orduñez, Candebat y Godínez (2013), a través de análisis estáticos no lineales, determinan la poca

ductilidad que presentan las columnas prefabricadas de las pilas de puentes contruidos con la misma tipología.

En general, los problemas identificados por estos autores en los puentes prefabricados contruidos en las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba se refieren a:

- Poca redundancia debido a la presencia de gran cantidad de juntas en los tableros isostáticos, aspecto que impide la transmisión y distribución adecuada de las cargas entre elementos.
- Longitudes de apoyo de vigas sobre cabezales de pilas y estribos insuficientes en puentes con esviaje y ubicados en curvas.
- Falta de monolitismo en la unión columna prefabricada-vaso fundido *in situ*.
- Baja ductilidad asociada al poco confinamiento del hormigón del núcleo de las columnas de pilas y estribos, debido a espaciamientos inadecuados del refuerzo transversal.
- Ausencia de trabas o topes sísmicos para evitar la caída de los tramos.

Algunos de los problemas detectados han sido la causa de daños severos y hasta el colapso de puentes en otras zonas del planeta. Kawashima y Unjoh (2004) exponen que una de estos, la caída de tramos simplemente apoyados, provocó los daños observados en el terremoto de Kobe (1995). Asimismo, Kawashima, Unjoh, Hoshikuma and Kosa (2010) y Aguiar (2011) han manifestado que algunas de las evidencias del mal comportamiento de los puentes durante el terremoto de Chile, 2010, fueron precisamente la ausencia o el mal diseño de las trabas sísmicas y la usencia de diafragmas; lo que propició la caída de los tramos de la superestructura.

Además, en inspecciones realizadas a las estructuras ubicadas en las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba se han podido detectar los problemas que se mencionan a continuación:

- Socavación local avanzada al pie de pilas y estribos.
- Pérdida de capacidad para soportar cargas de las losas prefabricadas del tablero. Rotura del hormigón.

- Juntas entre tramos isostáticos en muy mal estado.
- Ausencia de aparatos de apoyo o utilización de materiales inadecuados para sustituir los indicados en el proyecto (partes de neumáticos).
- Hundimiento del aproche como consecuencia de la socavación y la erosión del material de relleno.
- Ausencia del recubrimiento y acero expuesto y oxidado en elementos del pretil.
- Ausencia de recubrimiento; acero expuesto, altamente corroído, con pérdida de sección y partido en columnas de pilas.

Estos problemas se observan con frecuencia; además, se ha constatado el fallo de cuatro de ellos (puentes sobre los ríos La Magdalena, Avispero y Peladero en la carretera Granma, y sobre el río San Juan en la Circunvalación (Figura 2).



Figura 2. Puentes prefabricados de hormigón, fallos por socavación, carreteras de Santiago de Cuba.

Los elementos analizados, referidos al comportamiento de los puentes ante acciones sísmicas generadas por eventos fuertes en el mundo y a las características y condiciones técnicas de estas estructuras en Cuba, propician un elevado nivel de vulnerabilidad sísmica estructural; de ahí que el objetivo de este trabajo fue sustentar teóricamente un procedimiento para la rehabilitación estructural sismorresistente de puentes en el país. Este procedimiento resulta una herramienta importante para la mitigación del riesgo sísmico.

MÉTODO

Para cumplir el objetivo trazado se realizó una revisión bibliográfica relacionada con el tema de la rehabilitación estructural sismorresistente. Se adoptó la siguiente metodología.

1. Establecer una definición de rehabilitación estructural sismorresistente, teniendo en cuenta la diversidad de criterios que existen sobre este tema.
2. Definir los aspectos que deben ser evaluados para la selección de las estructuras que deben ser rehabilitadas.
3. Seleccionar las variables que intervienen en la evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica estructural de puentes.
4. Definir los parámetros que se deben considerar para seleccionar las estrategias de rehabilitación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La rehabilitación estructural sismorresistente de puentes en el mundo

Al decir de CYTED (2003) la rehabilitación de estructuras de hormigón armado y pre y postensado es una actividad compleja que exige un conocimiento profundo del comportamiento de los materiales, sistemas y procedimientos de ejecución. Algunas de las definiciones formuladas por la comunidad científica son las siguientes:

Gavarini (1994) manifiesta que la rehabilitación es la intervención hecha para la recuperación estructural y/o eliminar defectos estructurales.

Por su parte, González (1999) la iguala al término recuperación y afirma que es una operación que “considera los trabajos que se realizan para recuperar el estado inicial perdido con el deterioro; de modo que los elementos readquieran su capacidad resistente” (p. 25).

Esta investigación no concuerda con estos autores, que relacionan la rehabilitación únicamente con la recuperación del estado inicial de la estructura, pues una rehabilitación estructural requiere de una actualización en el análisis de

las cargas actuantes, lo que quizás implique un incremento de su capacidad resistente; o sea, un reforzamiento estructural.

Helene y Pereira (2007) expresan que “la rehabilitación comprende todas las actividades desde la evaluación de la estructura hasta su protección una vez reparada y reforzada” (p. 143). Manifiestan, además, la importancia de considerar el tiempo de vida útil de la estructura al realizar su rehabilitación.

Estos autores se refieren a dos aspectos importantes, primeramente señalan que la estructura puede requerir un reforzamiento; por tanto, están considerando la posibilidad de que su capacidad estructural original no sea adecuada para soportar el nivel actual de cargas. Luego, mencionan el término tiempo de vida útil, elemento importante; pues la rehabilitación debe ser encaminada precisamente a incrementar el tiempo de vida de la estructura. Asimismo, la definición dada por American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] (2012,) es considerada correcta, aunque incompleta, por cuanto manifiesta que “es un proceso mediante el cual se restablece o incrementa la resistencia de puentes” (p.3).

Refiriéndose específicamente a la rehabilitación sísmica, Applied Technology Council [ATC] 40, (1996) declara que “una estrategia de rehabilitación es una aproximación básica adoptada para mejorar el desempeño sísmico del edificio o, por otra parte, para reducir el riesgo existente a un nivel aceptable” (p. XIV).

ATC and Federal Emergency Management Agency [FEMA] 273, 274 (1997) y American Society of Civil Engineers and FEMA 356 (2000) expresan que la rehabilitación sísmica persigue la reducción de la vulnerabilidad sísmica de la edificación y que su objetivo es lograr un estado deseado de límites de daños y pérdidas para una demanda sísmica dada, la cual es usualmente seleccionada por el propietario, el ingeniero y/o por agencia públicas.

El Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de Construcción (2011) la conceptualiza como “la evaluación y el diseño de sistemas de rehabilitación sísmica para mejorar el desempeño sísmico de estructuras existentes en función del cumplimiento de un objetivo de desempeño sísmico” (p.3).

Estas últimas referencias mencionan elementos como objetivo de desempeño y estado deseado de límites de daños, poniendo de manifiesto uno de los aspectos más importantes del análisis sismorresistente actual: la rehabilitación por desempeño. Esto se refiere a la necesidad de una relación entre el nivel de demanda de cargas y el comportamiento esperado a partir del control de los daños que pueden ocurrir en la estructura.

Teniendo en cuenta los criterios de los autores mencionados, esta investigación no coincide con la utilización, para referirse a la rehabilitación, de vocablos como intervención y actividad, por considerarlos muy simplistas. Según las definiciones examinadas, la rehabilitación implica la ejecución de actividades o tareas; por tanto, es un proceso que debe integrarlas, ya que estas individualmente no aseguran su éxito, que radica, precisamente, en su interrelación efectiva. Involucra también la necesidad de retroalimentación sistemática, pues, como expresan ATC-40 (1996), ATC and FEMA 273, 274 (1997) y American Society of Civil Engineers and FEMA 356 (2000) su objetivo final está dirigido a garantizar un mejor desempeño ante la demanda de cargas consideradas; por consiguiente, las medidas adoptadas y su implementación deben ser analizadas para garantizar su eficacia y su viabilidad técnica y económica.

Se asume entonces, como definición a los efectos de esta investigación, que la rehabilitación estructural sismorresistente es un proceso integrador dirigido a incrementar el tiempo de vida útil de la estructura, para un nivel controlado de daños en relación con un nivel definido de cargas; proceso que exige además retroalimentación constante.

En relación con el tratamiento de este tema en el caso de los puentes, Buckle et al. (2006), Wilson and Ryan (2009) y el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica [CFIACR] (2013) concuerdan en establecer que el proceso de rehabilitación sismorresistente se sustenta en tres etapas: el análisis para la selección y priorización de las estructuras que se rehabilitarán, la evaluación detallada de su vulnerabilidad sísmica estructural y la selección de la estrategia de rehabilitación. A continuación se muestra un análisis de los

elementos teóricos que deben ser considerados en el análisis para la selección y priorización y en la selección de las estrategias de rehabilitación.

- **Etapas de análisis para la selección y priorización**

En esta etapa, cuyo objetivo consiste en identificar aquellas estructuras con mayor probabilidad de ser dañadas e incluso colapsar durante un sismo fuerte, se han propuesto diferentes metodologías. En general, las estudiadas refieren como aspectos decisivos en la selección de las estructuras los siguientes (Bazoz and Kiremidjian, 1995; Buckle et al., 2006 y Willson and Ryan, 2009):

- Categoría de importancia de la estructura y su impacto
- Nivel preliminar de su vulnerabilidad sísmica estructural
- Nivel de peligrosidad sísmica del sitio

Muntasir (2011) realizó un análisis de métodos existentes para la priorización de puentes que se van a rehabilitar. A continuación, se muestran las principales consideraciones adoptadas por varios de estos métodos y las principales ventajas y desventajas identificadas por este autor (tabla 1).

Tabla 1. Revisión de métodos existentes para la priorización. Factores considerados, ventajas y desventajas

Factores considerados	Ventajas	Desventajas
Método: Babei and Hawkins (1991)		
Factor de carácter crítico: tipo de ruta, distancia hasta el desvío, utilidad, promedio de tráfico diario, longitud del puente. Factor de vulnerabilidad: aceleración en roca, vida remanente y vulnerabilidad estructural.	Los puentes son divididos en cinco grupos, según sus deficiencias estructurales. Luego, los puentes de cada grupo son evaluados en términos de su importancia.	Ambos factores poseen el mismo peso en el modelo de priorización. No siguen ningún procedimiento para asignar el peso.
Método: Cooling et al (1992)		
Factor de riesgo sísmico:	Dos niveles de análisis	No consideran el

Factores considerados	Ventajas	Desventajas
probabilidad de fallo y consecuencias del fallo. Estas últimas son derivadas mediante una función de valores multiatributos.	permiten una evaluación más detallada de los factores que provocaron desempeños inadecuados en terremotos pasados.	volumen de tráfico, factores económicos y factores relacionados con el costo de la rehabilitación. El rango obtenido por la multiplicación de dos componentes principales puede distorsionar el rango final.
Método: FHWA (1995)		
Factores de vulnerabilidad, peligro sísmico y factores socioeconómicos.	Los puentes son clasificados en cuatro grupos de acuerdo con el coeficiente de aceleración y la categoría de importancia, lo que ayuda a identificar los puentes que necesitan ser rehabilitados.	No se considera el estado de los elementos del puente.
Método: Transport Quebec (1996)		
Índice de función, índice de condición e índice de vulnerabilidad.	Toma en cuenta el tipo de ruta y de puente a evaluar, el volumen de tráfico, la distancia hasta el desvío, condición de la cimentación y el comportamiento estructural.	Ignora el factor económico, la relación costo-beneficio, condiciones del suelo y vulnerabilidad de los elementos de la estructura.

Fuente: Muntasir (2011)

En la tabla 1 se observa que los autores estudiados por Muntasir (2011) coinciden con los autores citados anteriormente, ya que consideran como uno de los factores determinantes para la priorización las características e importancia de la estructura. Igualmente, se puede constatar que el nivel de vulnerabilidad estructural es otro factor esencial. A continuación, se muestra un análisis de estos dos aspectos.

En relación con la clasificación de la categoría o importancia de las estructuras, esta investigación, teniendo en cuenta criterios presentados, además de lo expresado por Priestley, Seibley y Calvi (1996), considera que se deben tener en cuenta aspectos imprescindibles, tales como:

- Sociales: relacionados con el acceso a comunidades con gran cantidad de habitantes que pueden ser afectadas por sismos fuertes, incidencia en la recuperación postsismo de las comunidades, acceso a instalaciones esenciales (salud, educación, estaciones de bombero y policía) y presencia sobre la estructura de líneas de conducción de agua, gas, telecomunicaciones u otras.
- Técnicos: relacionados con la categoría de la vía, tipología estructural, los daños aceptados en la estructura según el nivel de peligrosidad sísmica y su incidencia en las actividades posterremoto; o sea, el desempeño estructural deseado para cada nivel de acción sísmica.
- Económicos: relación entre el costo de rehabilitación y el valor de construcción de una nueva obra, impacto en la economía de la región, así como su incidencia en la recuperación económica, además de las pérdidas que conlleva la no utilización de la estructura por impago de peaje y utilización de desvíos apartados.
- Políticos: concernientes al acceso a zonas estratégicas desde el punto de vista militar y a entidades gubernamentales y de defensa.

Asimismo, el autor considera que aspectos relacionados con el impacto al medioambiente también deben ser evaluados. Esta reflexión se basa en lo manifestado por Borrajo (1999), el cual asegura que el sistema hidrológico debe ser protegido, ya que:

(...) los ecosistemas asociados y los cursos de agua son muy valiosos, al coexistir los medios terrestre y acuático en una situación de frágil equilibrio. Además su marcado carácter lineal los hace especialmente vulnerables (...), cualquier vertido o alteración del medio acuático también puede tener fatales consecuencias (p.8).

De igual manera, Villareal (2002) asegura:

La interferencia que causan las infraestructuras de los puentes en la red hidrológica, el impacto de las comunidades en las riveras y las perturbaciones que se puedan generar en los mantos freáticos, son un grupo de factores que se deben tener en cuenta (...) (p.821).

Por tanto, estos aspectos se relacionan con el impacto negativo que supone el daño o colapso de una estructura en el recurso hidrológico que salva y, por ende, en la ecología de la región.

Igualmente, los elementos históricos deben ser tenidos en cuenta, pues las estructuras de valor patrimonial deben ser salvaguardadas. Helene y Pereira (2007) se refieren al valor histórico cuando manifiestan:

(...) si la estructura tiene valor histórico es patrimonio arquitectónico del país o la ciudad, se debe definir previamente, en unión de autoridades, propietarios, restauradores y especialistas en materiales, la manera en que se enfrentará la restauración, respetando al máximo su arquitectura y aspecto exterior, así como los materiales originales.

Inmediatamente, se muestran los aspectos considerados por algunas regulaciones y manuales.

Según Bazoz and Kiremidjian (1995) y Muntasir (2011) se establece un sistema multiatributos para determinar el rango de priorización de cada estructura. Este documento, al valorar el impacto de la estructura, analiza el promedio diario de tráfico que circula por el puente o por vías localizadas sobre o bajo este, la distancia hasta los desvíos, la existencia de espacios arrendados alrededor de la estructura, el tipo de ruta, su utilidad crítica y el paso por la estructura de líneas vitales (redes de agua, comunicación, electricidad). No incluye la evaluación de los aspectos económicos, medioambientales e históricos mencionados.

Buckle et al. (2006) y Willson and Ryan (2009) precisan factores socioeconómicos y de defensa que determinan la importancia de la estructura; de ahí que estas son

clasificadas en esenciales y ordinarias, obviando los aspectos medioambientales. Además, analizan como elementos subjetivos la redundancia de la red vial, las deficiencias de la estructura que no dependen de la acción sísmica y su vida de servicio anticipada. Este último parámetro es novedoso, pues tiene en cuenta la factibilidad de la rehabilitación según el tiempo de vida útil que le queda a la estructura.

Muntasir (2011) propone un método para la priorización basado en la obtención de un rango que depende del factor de importancia del puente (factores económicos, de comportamiento y social), del índice de costo (costo asociado a la rehabilitación, costo incurrido por el usuario de la vía durante la rehabilitación) y del índice de condición del puente (medida de la condición promedio del puente y sus componentes).

Este autor introduce en su propuesta el aspecto social a partir del análisis del volumen de tráfico, la distancia hasta los desvíos y la existencia sobre el puente analizado de líneas de transmisión de agua, electricidad y gas. Se observa en la propuesta de Muntasir (2011) la ausencia de aspectos ya mencionados; a decir, la incidencia de la estructura en la recuperación posterremoto de las comunidades aledañas que dependen del puente para garantizar la comunicación con el exterior, el impacto negativo que puede provocar el colapso o la ocurrencia de daños de estas estructuras al medioambiente.

CFIACR (2013), como aspecto novedoso, realiza una clasificación de la importancia de los puentes, incluyendo además las categorías de puentes críticos y convencionales. No obstante, los parámetros considerados para la clasificación también se basan, en lo fundamental, en aspectos sociales y económicos, dejando fuera los elementos relacionados con el impacto al medioambiente y el valor histórico de las estructuras.

En general, de este análisis se concluye que de una forma u otra los autores estudiados tratan los aspectos sociales, técnicos, económicos y políticos mencionados en la clasificación de las estructuras; pero frecuentemente obvian los parámetros relacionados con el impacto al medioambiente y aquellos que conciernen al valor patrimonial.

A propósito de la evaluación preliminar de vulnerabilidad sísmica estructural, constituyen puntos de referencia los métodos propuestos por Buckle et al. (2006). Uno de ellos utiliza índices sobre la base del análisis de los siguientes elementos: conexiones, aparatos de apoyo y longitudes de apoyo, pilotes, columnas y cimentaciones; estribos y suelos. Otro método se basa en la evaluación de daños esperados, a partir de la confección de curvas de fragilidad; las cuales son obtenidas sobre la base del conocimiento de las características de las estructuras, sus materiales, condiciones del sitio y peligrosidad sísmica del área.

Confirmada la incidencia del factor vulnerabilidad en la priorización, se han investigado otras metodologías basadas en la utilización de índices y que pueden ser utilizadas en esta etapa. Con este análisis se ha podido determinar cuáles son los parámetros que habitualmente proponen los investigadores para determinar el nivel de vulnerabilidad sísmica estructural.

Jara, J. M., Jara, M., Olmos y López (2010) realizan una revisión de métodos existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, identificando qué parámetros son usualmente empleados por sus autores (tabla 2). Estos autores señalan que fueron objeto de su investigación las propuestas realizadas por ATC – 6 - 2 (1983), ATC – 25 (1991), Dolce et al. (1994), Xueshen y Shuming (1995), Dicleli y Bruneau (1996) y Bazoz and Kiremidjian (1995).

Tabla 2. Parámetros que se emplean en distintas metodologías para estimar la vulnerabilidad sísmica de puentes

Parámetros	
Longitud de apoyos en pilas y estribos	Tipo de cimentación
Tipo de superestructura	Aceleración máxima del terreno
Año de construcción (normas usadas)	Tipo de estribos
Ángulo de esviaje	Longitud del puente
Material de las pilas	Ancho del puente
Refuerzo en pilas	Promedio de tráfico diario
Efectos de sitio	Altura de estribos
Tipos de apoyo	Refuerzo de la cimentación
Potencial de licuefacción	Longitud efectiva de columnas
Irregularidad en rigidez	Dimensión transversal de columnas
Rehabilitaciones previas	Asentamiento de terraplenes de acceso
Número de claros	Estado de conservación del puente
Tipo de subestructura	Procedimiento constructivo
Nº de articulaciones internas	Elementos no estructurales

Fuente: Jara et al. (2010)

Relacionando los parámetros identificados en la tabla 2 por Jara et al. (2010) con las afectaciones que más comúnmente han manifestado estas estructuras durante la ocurrencia de sismos fuertes, se puede comprobar que estos están intrínsecamente relacionados con los aspectos que han constituido causa de daños. Por lo tanto, su análisis permite establecer con qué nivel de probabilidad las estructuras evaluadas pueden ser afectadas por eventos de este tipo.

Como parte de esta investigación se valoraron otras metodologías, constatando que los elementos considerados por estos autores se encuentran entre los identificados en la tabla 2 por Jara et al. (2010).

Como resultado de este análisis se pueden definir los parámetros que son usualmente utilizados por los especialistas para evaluar la vulnerabilidad sísmica

de puentes. Sin embargo, teniendo en cuenta los daños observados, existen algunos elementos que no son tomados en cuenta por los métodos estudiados y que intervienen de forma significativa en el comportamiento de estas estructuras:

- La evaluación de la calidad de los materiales de construcción de la estructura.
- La existencia de trabas o topes sísmicos y diafragmas que garanticen la estabilidad de los tramos.
- La rigidez de la estructura, expresada a través de su valor de período natural de vibración.
- La probabilidad de ocurrencia del fenómeno de resonancia entre la estructura y el suelo.
- La falta de homogeneidad del suelo, que propicia variación en su respuesta ante las acciones sísmicas y, por tanto, modifica el comportamiento de la estructura, principalmente en puentes continuos de longitud significativa.
- La precisión de la cercanía de fallas geológicas: su cercanía presupone alta probabilidad de daños en las estructuras construidas en la zona.
- El análisis de la relación de esbeltez de las columnas de pilas y estribos y no la altura de estas, teniendo en cuenta que este parámetro por sí solo no refleja cuán susceptibles de ser dañados son estos elementos.

La inclusión de estos parámetros garantiza una evaluación integral, lo cual permite identificar aquellos aspectos que afectan el comportamiento estructural global y facilita la posterior evaluación detallada de las estructuras con mayor nivel de vulnerabilidad preliminar.

- **Etapas de selección de la estrategia de rehabilitación**

La etapa de selección de la estrategia de rehabilitación, al decir de ATC and FEMA 273 (1997), American Society of Civil Engineers and FEMA 356 (2000), Buckle et al. (2006), New Zealand Society for Earthquake Engineering [NZSEE] (2006), Willson and Ryan (2009) y CFIACR (2013), incluye el diseño de las medidas de rehabilitación, luego de determinar si las estructuras analizadas son vulnerables sísmicamente.

Estos autores coinciden en que la adopción de dicha estrategia se basa en la consideración de varios aspectos, haciendo especial énfasis en el costo-beneficio de las medidas seleccionadas y en sus parámetros técnicos. Por otra parte, Buckle et al. (2006), Willson and Ryan (2009) y CFIACR (2013) también mencionan aspectos sociales, políticos, históricos y medioambientales. Las valoraciones que realizan estos autores en relación con cada uno de los aspectos mencionados se muestran a continuación.

- Aspectos técnicos: relacionados con las técnicas constructivas seleccionadas al aplicar las medidas, los materiales; la existencia de mano de obra calificada y la tecnología. Estos elementos deben ser escogidos en función de la factibilidad de su utilización, de acuerdo con la región y al país.
- Aspectos económicos (costo-beneficio o efectividad): la aplicación de una estrategia de rehabilitación debe ser efectiva, por lo que sus beneficios deben ser comparados con los altos costos que implica el proceso. Es importante tener en cuenta que los costos de rehabilitación, en casos extremos, pueden ser dos o tres veces superiores a los costos del diseño sismorresistente de una nueva estructura.
- Aspectos medioambientales: la estructura puede estar ubicada en zonas sensitivas desde el punto de vista medioambiental. Las medidas de rehabilitación implican ruido y generación de vibraciones que afecten a las comunidades. Asimismo, la generación de escombros y basura debe ser evitada.
- Aspectos sociales: las medidas no deben modificar la capacidad de la estructura en cuanto a cantidad de tráfico para evitar afectaciones al tránsito. Además, el confort en la circulación vehicular debe garantizarse.
- Aspectos históricos: las medidas aplicadas no deben modificar la apariencia de la estructura cuando esta posea valor histórico. De igual manera, los materiales empleados deben respetar su estética.

El autor coincide con Helene y Pereira (2007) cuando afirman que el momento de elegir la estrategia de rehabilitación estructural es importante, ya que influirá irremediablemente en los costos del proyecto, la duración de los trabajos, la

eficacia de la reparación y la durabilidad de la misma. Estos autores también afirman que los materiales de reparación y el sistema de aplicación de los mismos debe ser objeto de un juicioso estudio.

Igualmente, las estrategias adoptadas deben retroalimentar el proceso de rehabilitación. En este sentido, se debe garantizar que con su implementación la estructura intervenida cumpla con el nivel de desempeño predeterminado en función de su importancia y la acción sísmica utilizada en el análisis.

CONCLUSIONES

1. Los puentes de hormigón son vulnerables a las acciones generadas por terremotos fuertes. Los daños más comunes están relacionados con la caída de los tramos, fallas por cortante de columnas de pilas, nudos y cabezales; así como las fallas debido a la presencia de suelos suaves.
2. La rehabilitación estructural sismorresistente es un proceso integrador dirigido a incrementar el tiempo de vida útil de la estructura, para un nivel controlado de daños en relación con un nivel definido de cargas; proceso que exige, además, retroalimentación constante.
3. La estructuración en tres etapas del proceso de rehabilitación estructural sismorresistente: priorización, evaluación detallada de la vulnerabilidad y selección de la estrategia para la rehabilitación, debe ser considerada al diseñar un procedimiento para ejecutar este proceso.
4. La clasificación de la importancia de los puentes debe fundamentarse en los aspectos técnicos, económicos, sociales y políticos usualmente utilizados por los métodos existentes; asimismo, elementos medioambientales e históricos deben ser incorporados. De igual modo, estos parámetros deben constituir la base de la selección de las estrategias de rehabilitación.
5. Coexisten metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural de puentes. No obstante, entre los parámetros imprescindibles para una evaluación integral no se consideran la degradación de la rigidez de la estructura, la resonancia suelo-estructura y la esbeltez de las columnas de pilas y estribos, entre otras.

6. Los puentes prefabricados de Santiago de Cuba poseen una elevada vulnerabilidad sísmica estructural asociada a su diseño, pues se caracterizan por ser estructuras simplemente apoyadas poco redundantes, con longitudes de apoyo insuficientes, sin trabas sísmicas, con falta de monolitismo en las uniones columna-cabecial de pilas y estribos y poca ductilidad de sus columnas debido a la distribución de acero de refuerzo transversal. Por otro lado, manifiestan un deterioro significativo debido al largo período de explotación sin un mantenimiento adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, R. (2011). *El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para el Ecuador*. ISBN 978-9978-92-979-7.

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2012). *LRFD Bridges. Design specifications*. EE. UU.: Autor

American Society of Civil Engineers and Federal Emergency Management Agency [FEMA] 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. EE. UU.: Autor

Applied Technology Council [ATC]. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (Volume 1). California Seismic Safety Commission. Proposition 122. Seismic retrofit practices improvement program. Report sse 96-01. EE. UU.: Autor.

Applied Technology Council [ATC]) and Federal Emergency Management Agency [FEMA] 273. (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. EE. UU.: Autor

Applied Technology Council [ATC] and Federal Emergency Management Agency (FEMA) 274. (1997). *NEHRP commentary on the Guidelines for the Seismic rehabilitation of buildings*. EE. UU.: Autor.

Basoz, N. and Kiremidjian, A. (1995). *Prioritization of Bridges for Seismic Retrofitting* [Technical Report NCEER-95-0007].

Borrajo, J. (1999). *Efectos ambientales de la construcción de carreteras* [Curso de dirección de obras].

Buckle, I., Friedland, I., Mander, J., Martin, G., Nutt, R. and Power, M. (2006). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1-Bridges*. (s. l.): (s. n.).

Candebat, D., Godínez, G. y Caballero, L. F. (2012). Métodos experimentales para la estimación de la vulnerabilidad sísmica de puentes prefabricados de hormigón: Puente Arroyito. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 27(2), 52-66.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica [CFIACR]. (2013). *Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. San José, Costa Rica: Lanmanme UCR.

Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de Construcción. (2011). *Norma ecuatoriana de la construcción. NC-11. Capítulo 3. Riesgo sísmico, evaluación y rehabilitación de estructuras*. Ecuador: autor.

Gavarini, C. (1994). Monument Safety in Seismic Areas. *Earthquake Spectra*, 10, 189-195.

González, L. (1999). *Experiencias y métodos para la conservación de puentes de carretera de la República de Cuba* (2 tomos). La Habana, Cuba.

Helene, P. y Pereira, F. (2007). *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto*. ISBN: 8560457-00-3.

Jara, J. M., Jara, M., Olmos, B y López, J. (2010). Criterio de selección de estructuras tipo de puentes para su evaluación sísmica. En *Memorias del VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación*.

Kawashima, K. and Unjoh, S. (2004). Seismic design of highway bridges. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4(3) (Special Issue), 10.

Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J. and Kosa, K. (2010). *Damage of transportation facility due to 2010 chile earthquake*. Bridge team dispatched by Japan Society of Civil engineers [Presentación de power point].

Morejón, Blanco, G., Candebat Sánchez, D., Ferrera Toujague, H., Márquez Mercerón, P., Arango Arias, E., Zapata Balanqué, J., Chuy Rodríguez, T. y Díaz Bermúdez, L. (2006). *Evaluación de la vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos naturales de las carreteras de interés nacional de la provincia Santiago de Cuba: Autopista Nacional* [Fondos del Cenais y del Centro Provincial de Vialidad]. Santiago de Cuba, Cuba.

Muntasir, A. (2011). *Seismic performance evaluation of multi column bridge bent retrofitted with different alternatives* (A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of applied science).

New Zealand Society for Earthquake Engineering [NZSEE]. (2006). *Assessment and improvement of the structural performance of buildings in earthquakes*.

Orduñez, U., Candebat, D. y Godínez, G. (2013). *Análisis estático no lineal de puentes prefabricados de hormigón* [Fondos del Cenais]. Santiago de Cuba, Cuba.

Priestley, M., Seible, F. y Calvi, G. M. (1996). *Seismic Design and retrofit of Bridges*. Editorial John Wiley and Sons.

Red Rehabilitar. Ciencia y Tecnología para el desarrollo [CYTED]. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección* [CD-ROM].

Torres, P. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural de puentes de tipología cubana-italiana de la Autopista Nacional* (Tesis en opción al título de Ingeniero Civil). Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Wilson, N. y Ryan, K. (2009). *Seismic retrofit guidelines for utah highway bridges*. Report No. UT-09.06. 76 pp.

Villareal, G. (2002). Consideración del medio ambiente en la construcción, evaluación y rehabilitación de puentes. En *I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente* (pp. 807-822).

Recibido: marzo de 2016

Aprobado: junio de 2016