

Impacto del terremoto de Limón de 1991 en el diseño estructural de puentes

Impact of the 1991 Limón Earthquake on structural design of bridges

María J. Rodríguez-Roblero^{1*}, Sergio Lobo-Aguilar², Luis G. Vargas-Alas³ y Rolando Castillo-Barahona⁴

¹Universidad de Costa Rica (UCR), Programa de Ingeniería Estructural, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica

²Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica

³Universidad de Costa Rica (UCR), Unidad de Puentes del LanammeUCR, San José, Costa Rica

⁴Universidad de Costa Rica (UCR), Programa de Ingeniería Estructural LanammeUCR, San José, Costa Rica

*Autora para contacto: maria.rodriguezroblero@ucr.ac.cr

(Recibido: 08/02/2020; aceptado: 15/03/2021)

ABSTRACT: This article describes the main damages observed in vehicular bridges as a consequence of the 1991 Limón earthquake. It also shows how this seismic event originated changes in the regulations that govern the design and construction in Costa Rica, specifically the seismic design of buildings and bridges. It is also argued that the impact of the Limón earthquake may also be identified in international bridge design specifications, since the structural failures that occurred as a consequence of this earthquake and other seismic events of the 1990s worldwide, motivated the revision and modification of the construction practices on bridges in seismically active regions.

Keywords: Infrastructure; Design Specifications; Seismic Design; Bridges; Seismic Vulnerability.

RESUMEN: En el presente artículo se describen los principales daños observados en puentes vehiculares como consecuencia del terremoto de Limón de 1991. También se muestra cómo este evento sísmico originó cambios en la normativa que regula el diseño y la construcción de obras civiles en Costa Rica, específicamente el diseño sismorresistente de edificaciones y puentes. Se plantea además que el impacto del terremoto de Limón puede identificarse también en especificaciones internacionales de diseño de puentes, ya que las fallas estructurales ocurridas como consecuencia de este terremoto y otros eventos sísmicos de los años noventa a nivel mundial, motivaron la revisión y modificación de las prácticas constructivas de los puentes en regiones sísmicamente activas.

Palabras clave: Infraestructura; especificaciones de diseño; diseño sismorresistente; puentes; vulnerabilidad sísmica.



INTRODUCCIÓN

El terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 constituye un evento importante para el desarrollo de la ingeniería sismo-resistente en Costa Rica. La importancia deriva de la magnitud del evento (M_w 7.7), de la extensión y gravedad de los daños provocados por el terremoto, pero principalmente por las investigaciones y cambios en la normativa originados por las fallas estructurales ocurridas en este sismo.

Los daños provocados por el terremoto en la infraestructura incluyeron el colapso de puentes, destrucción total de carreteras, inutilización de las vías férreas, fallas en el sistema de abastecimiento de agua potable y en las instalaciones portuarias, la afectación en el servicio en el hospital provincial, la destrucción de escuelas, daños en aproximadamente el 25% de las viviendas en la zona afectada y en una refinería de derivados del petróleo (Morales, 1994). El costo estimado de los daños se calculó entre un 5% y 8% del producto interno bruto (PIB) de Costa Rica en el año 1991 (Bermúdez, 2011). La información detallada de la cuantificación de la afectación en puentes y edificaciones ocasionada por el terremoto puede encontrarse en diferentes publicaciones, por ejemplo, el reporte del *Earthquake Engineering Research Institute* (EERI, 1991) de los Estados Unidos y en las descripciones de los daños observados reportados por Mitchell y Tinawi (1992); Santana (1992); Sauter (1994) y Morales (1994) entre otros. También se presenta información específica acerca de los daños en los acueductos y la refinería en O'Rourke y Ballantyne (1992).

Si bien es ampliamente reconocido el impacto del terremoto de Limón en términos de las pérdidas ocasionadas, generalmente no se hace énfasis en el impacto positivo de este terremoto. En la presente contribución se muestra que este evento tuvo un impacto perdurable en la práctica de la ingeniería, porque promovió la revisión de la normativa existente, fomentó la investigación en ingeniería sismo-resistente y la mejora de las prácticas constructivas. Además, se describe cómo las fallas observadas en diferentes elementos de la infraestructura también han contribuido a la investigación y el mejoramiento de las especificaciones técnicas internacionalmente.

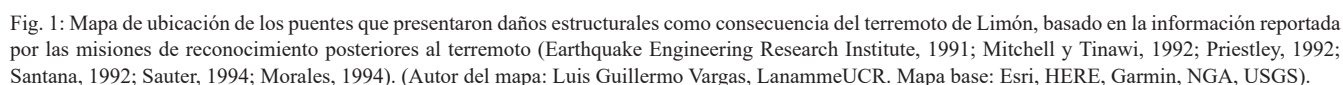
DAÑOS OBSERVADOS EN PUENTES VEHICULARES

Aunque en varios sismos fuertes en Costa Rica se ha presentado afectación en los puentes, el terremoto de Limón fue particularmente destructivo para este tipo de estructuras. Además de los puentes vehiculares, ocho puentes de ferrocarril resultaron severamente dañados (Sauter, 1994) y las vías férreas resultaron deformadas e inutilizadas como consecuencia del sismo.

La comunicación terrestre entre la ciudad de Limón y la capital estuvo interrumpida durante una semana y el acceso al Valle de La Estrella y la región Caribe Sur estuvo seriamente afectado durante varios meses por los daños en los puentes en las dos principales rutas de la región Caribe (rutas nacionales 32 y 36). Los puentes sobre los ríos Rojo, Toro, Cuba, Blanco y Chirripó sobre la Ruta Nacional 32, la cual es la principal ruta al Atlántico, sufrieron daños estructurales. Los puentes sobre la Ruta Nacional 36 sobre los ríos Vizcaya, Bananito, La Estrella y Estero Negro colapsaron y los puentes sobre el río Banano y Sixaola presentaron daños significativos (Morales, 1994). También se reportaron daños en otros puentes sobre esas dos rutas (puentes sobre los ríos Destierro, Escondido, Aguas Claras, San Miguel y el puente sobre la quebrada Calderón) y algunos de los daños son visibles todavía. La Ruta Nacional 36 es la única vía de acceso a la región Caribe Sur del país y el colapso de estos puentes significó la interrupción del acceso terrestre de todas las comunidades de la zona, lo cual dificultó significativamente la atención de la emergencia.

En la figura 1 se muestra en un mapa la ubicación de los puentes en los que se reportaron daños estructurales y en las figuras 2- 7 se muestran ejemplos de los daños ocasionados por el sismo. La información presentada en este artículo respecto a los daños observados en los puentes se basa en los reportes de las misiones de reconocimiento de expertos nacionales e internacionales que se efectuaron en el año 1991 posterior al terremoto.

Las causas principales del colapso de los puentes fueron: licuefacción (EERI, 1991; Youd, 1993; Mora y Yasuda, 2011; Franke y Rollins, 2017); pérdida de soporte del tablero del puente por la existencia de longitudes de asiento insuficientes, falta de continuidad de las superestructuras o ausencia de sistemas de restricción en puentes con superestructuras de vigas simplemente apoyadas (Santana, 1992; Mitchell y Tinawi, 1992; Sauter, 1994), tal como se muestra en la figura 2. En esa figura se presenta como ejemplo el colapso de un tramo en el puente sobre el río Chirripó (Ruta Nacional 32) ocasionado porque los desplazamientos producidos por el sismo fueron mayores que la longitud apoyada de las vigas.



En las figuras 4 y 5 se muestran dos ejemplos en los cuales el colapso de los puentes se produjo por pérdida de soporte; en el primer caso porque los desplazamientos de la superestructura provocados por el sismo excedieron las longitudes de asiento existentes y en el segundo porque el asentamiento de la pila provocó el colapso de los dos tramos apoyados sobre la pila. Finalmente, en las figuras 6 y 7 se muestra la condición de los pilotes en los bastiones en el puente sobre el río Cuba (Ruta Nacional 32) en el año 1991 y en el 2019 respectivamente. Como se puede observar, al año 2019 dicho puente aún no había sido rehabilitado o sustituido, lo cual constituye un riesgo para los usuarios de esta vía. Es importante destacar que existen otros puentes en la red vial nacional que presentan deficiencias importantes y no han sido rehabilitados o reemplazados oportunamente debido a la ausencia de un sistema integral de gestión de los puentes (Vargas Alas y Villalobos Vega, 2019).

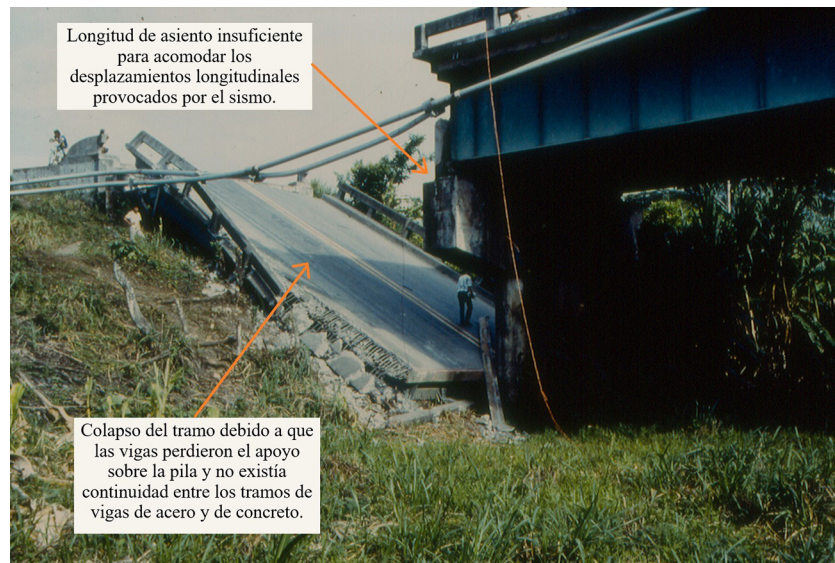


Fig. 2: Colapso de un tramo del puente sobre el río Chirripó en la Ruta Nacional 32 como consecuencia de la pérdida de soporte debido a la existencia de longitudes de asiento limitadas y falta de continuidad de la superestructura (Fotografía: Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica).



Fig. 3: Destrucción del acceso al puente (puente sobre el río Bananito en la Ruta Nacional 36). Este puente presentó el colapso del puente y la destrucción completa de la vía de acceso (Fotografía: Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica).



Fig. 4: Estado del puente sobre el río Bananito (Ruta Nacional 36) después del terremoto de Limón. Este puente presentó la pérdida de soporte de la superestructura, ruptura de los pernos de anclaje, rotación de los bastiones y desplazamiento del relleno. En este caso, las dos superestructuras que formaban el puente sufrieron la pérdida de soporte (Fotografía del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica).

Los ejemplos anteriores y otros deterioros en los puentes asociados al terremoto evidenciaron la vulnerabilidad de gran parte de los puentes existentes ante eventos sísmicos extremos. En el diseño sismorresistente, el desempeño aceptable se define en función de la importancia de la estructura y la intensidad sísmica considerada. En el caso de puentes, el riesgo para la vida debe ser mínimo, la probabilidad de colapso muy baja y los puentes esenciales deben permanecer funcionales (Buckle et al., 2006). Para los sismos de gran intensidad como el terremoto de Limón se prevé que las estructuras presenten daños importantes, pero se debe evitar las pérdidas humanas y el colapso de las estructuras. Los eventos sísmicos de gran magnitud son considerados como ensayos a gran escala de las prácticas de ingeniería (Gutiérrez, 2012) y el terremoto de Limón efectivamente demostró la necesidad de una revisión de la normativa de diseño y construcción empleada hasta la fecha, ya que los requisitos establecidos no eran suficientes para reducir el impacto de los sismos a un nivel tolerable. En las siguientes secciones se muestran algunos ejemplos en los que es posible identificar algunas de las lecciones aprendidas en el terremoto del Limón. Sin embargo, se considera relevante señalar que, a pesar de los cambios realizados en la normativa, si se considera el año de la construcción de los puentes que colapsaron y la normativa utilizada en su diseño, el comportamiento estructural deficiente demostrado por los colapsos ocurridos podría presentarse en otros puentes de la red vial nacional en servicio actualmente. Para mostrar la relevancia de la consideración de la vulnerabilidad sísmica de los puentes en servicio, en la figura 8 se muestran los resultados del análisis de los datos de inventario de puentes recopilados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) hasta el año 2016 (Muñoz Barrantes et al., 2016).

En la figura 8 se muestra el número de puentes diseñados y construidos en un período específico. La información presentada corresponde a los puentes para los cuales se conoce el año de publicación de las especificaciones utilizadas, el año en el que se finalizó el diseño y la construcción. Se puede apreciar en la figura como la mayoría de los puentes en servicio en la red vial nacional fueron diseñados y construidos utilizando especificaciones anteriores al año 1991, las cuales quedó demostrado que no aseguraban un desempeño sísmico aceptable.

IMPACTO DEL TERREMOTO DE LIMÓN EN LAS ESPECIFICACIONES EN COSTA RICA

El objetivo de las especificaciones de diseño sismorresistente es regular el diseño, la construcción y la rehabilitación de las estructuras, de forma que se minimice el impacto de los sismos, se salvaguarde la vida de los usuarios y se procure que el daño que se produzca sea reparable y no provoque el colapso de la estructura. Estas especificaciones han sido desarrolladas



Fig. 5: Vistas del puente sobre el río Vizcaya en la Ruta Nacional 36 después del terremoto de Limón. En la fotografía A se aprecia la rotación del bastión y uno de los tramos colapsados. En la fotografía B se muestran los tramos colapsados vistos desde el acceso Sureste (Fotografías del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica).

progresivamente a partir de la investigación teórica y experimental del comportamiento de materiales, componentes y sistemas estructurales, y de las evidencias recolectadas en los eventos sísmicos reales. Las especificaciones incluyen recomendaciones en dos aspectos fundamentales: la cuantificación de las demandas previsible en las estructuras y la definición de las características físicas y mecánicas que deben tener los sistemas estructurales. En el caso de Costa Rica, uno de los impactos más visibles del terremoto de Limón en la normativa costarricense estuvo orientado hacia la primera de esas dos partes fundamentales, ya que generó conciencia acerca de la necesidad de actualizar la estimación de la amenaza sísmica y la respuesta esperada de las estructuras para las condiciones particulares de un sitio. Esto se explica a continuación.

Los estudios de amenaza sísmica son la herramienta que permite identificar las áreas expuestas potencialmente a eventos sísmicos y estimar las intensidades probables de dichos eventos. La información de las intensidades previsible de los sismos es imprescindible para establecer los requisitos para la construcción sismorresistente. En las especificaciones de diseño sismorresistente la amenaza se presenta mediante parámetros que indican la estimación de la sacudida sísmica esperable en un sitio. En el caso de los códigos sísmicos de Costa Rica la amenaza se ha presentado mediante mapas de isoaceleraciones (así se presentaba en el Código Sísmico de 1986) o definiendo zonas sísmicas (por ejemplo, los Códigos sísmicos del 2002, 2010 y la actualización del 2014). Esta información se presenta habitualmente en las especificaciones de diseño debido a que el desempeño de las estructuras está influenciado por la intensidad, duración y contenido de frecuencias de los sismos.

En el año 1991, la única especificación para el diseño sismorresistente vigente en Costa Rica era el Código Sísmico publicado en el año 1986 (Santana, 1992). En este código la amenaza se presentaba mediante curvas de isoaceleración, las cuales representaban los valores máximos probables de aceleración en roca (como un porcentaje de la aceleración de la gravedad) para cuatro periodos de retorno correspondientes a 50, 100, 500 y 1000 años. Se muestra como ejemplo en la figura 9 uno de los mapas incluidos en el Código Sísmico de 1986. En este mapa se observa que, en la región del Caribe costarricense se esperaban aceleraciones en el rango de 20% a 25% de la gravedad, para el período de retorno de 500 años, en contraposición de las zonas del Pacífico Central y Sur, en donde se consideraban aceleraciones entre el 30% y el 40% de la aceleración de la gravedad. Se puede comprobar entonces, que la región Caribe era considerada como de menor actividad sísmica. La ocurrencia de un sismo de magnitud $M_w 7.7$ en una zona clasificada de baja sismicidad puso de manifiesto que la amenaza sísmica estaba siendo subestimada y las curvas de isoaceleración del código no reflejaban las condiciones de la región. Como señala



Fig. 6: Condición de los pilotes en los bastiones del puente sobre el río Cuba (Ruta Nacional 32) después del terremoto de Limón (Fotografía: Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica).



Fig. 7: Condición de los pilotes en los bastiones del puente sobre el río Cuba (Ruta Nacional 32) en el año 2019 (Fotografía: por Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica).

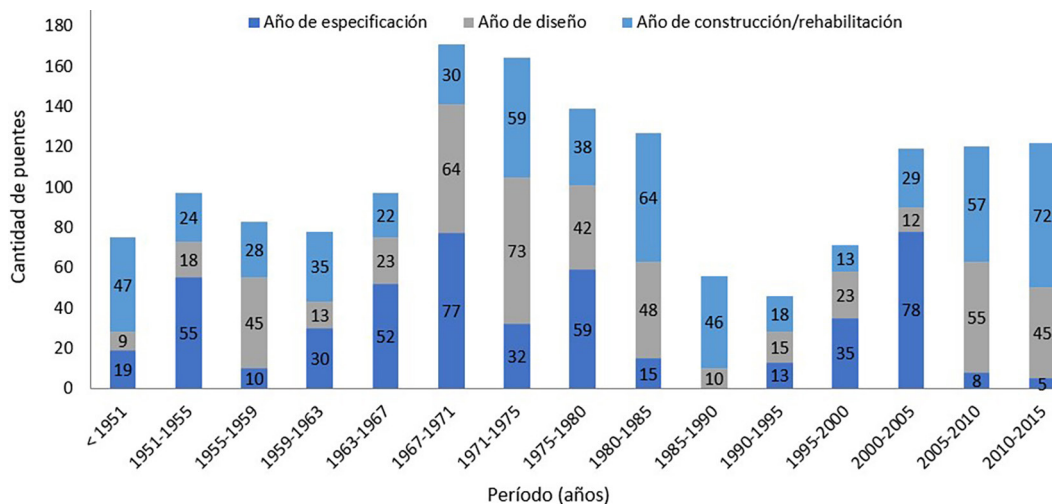


Fig. 8: Cantidad de puentes en el inventario de puentes de Costa Rica para los que está disponible la información del año de la especificación, año del diseño y de la construcción al año 2016. Se presenta la cantidad de puentes que fueron diseñados y construidos en cada período. El año de especificación se indica con el propósito de mostrar el período en que fueron publicadas las especificaciones. La figura muestra que la mayoría de puentes en servicio fueron diseñados y construidos con normativa anterior al año 1991 (Basado en la información de Muñoz Barrantes et al., 2016).

Gutiérrez (2012) los sismos ocurridos en los años 1990 y 1991 demostraron la necesidad de la revisión de la determinación de la amenaza sísmica para Costa Rica. Si bien los estudios de amenaza requieren su actualización de forma periódica para incorporar la nueva información registrada, para considerar los avances en la investigación y comprensión de los sismos, la reevaluación en este caso se requería porque en el estudio de amenaza sísmica la información relativa a los sismos históricos ocurridos en la zona Caribe no se incluyó debido a la imprecisión en la ubicación de los eventos (Santana, 1992) y esta omisión había conducido a subestimar el potencial sísmico en Limón.

La Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica (CPCSCR) inició entonces con la revisión exhaustiva de las disposiciones del código sísmico vigente, lo cual resultó en la publicación de un nuevo código sísmico en el año 2002. Además del estudio, discusión y colaboración de expertos en ingeniería sismorresistente en los diferentes comités de trabajo de la CPCSCR, Gutiérrez (2012) como miembro redactor del código sísmico indica que la creación del programa de posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica en el año 1991 y la construcción de las nuevas instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) en 1994 contribuyeron al desarrollo de la nueva versión del código. Los estudiantes y profesores del programa de posgrado contribuyeron con investigaciones necesarias para el desarrollo del nuevo código y el LanammeUCR ha sido desde entonces el laboratorio especializado en donde se han realizado los ensayos requeridos para caracterizar los materiales, componentes estructurales y sistemas constructivos utilizados en Costa Rica.

Por otra parte, es importante destacar que en las versiones del Código Sísmico de Costa Rica de los años 2002 y 2010 se indica explícitamente que las disposiciones son aplicables para edificaciones y estructuras con un comportamiento sísmico semejante. Las disposiciones específicas para el diseño y rehabilitación de puentes se publicaron hasta el año 2013 en los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica, 2013). Esta publicación fue elaborada por el Comité de Puentes de la CPCSCR y publicada por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Para la elaboración de este documento se consideró especialmente el documento *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design* de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2009) y las especificaciones guía *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges* (Buckle et al., 2006). En el artículo 1.4 de los Lineamientos se indica explícitamente que para el diseño de

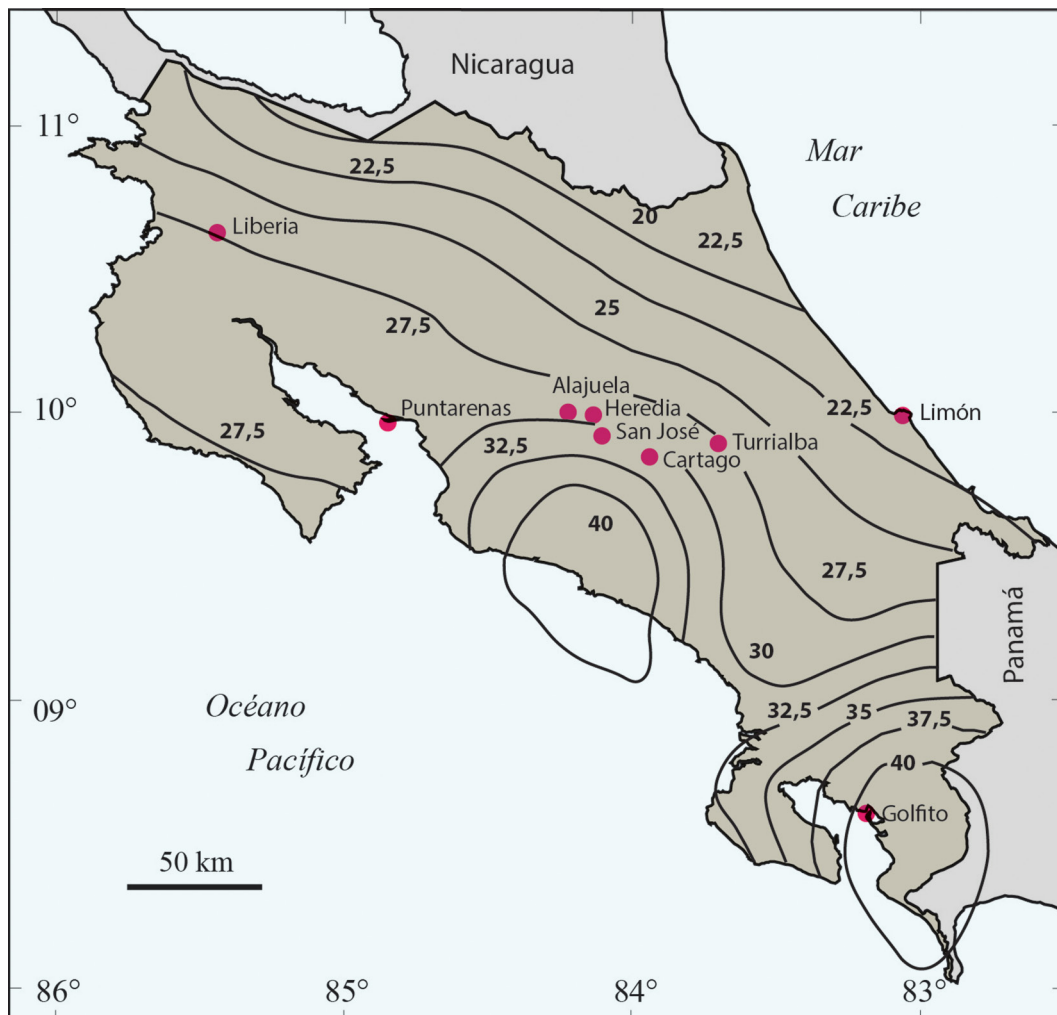


Fig. 9: Mapa de isoaceleración (en porcentaje de la aceleración de la gravedad) correspondiente al período de retorno de 500 años basado en el incluido en el Código Sísmico de 1986.

puentes nuevos se debe cumplir las disposiciones del documento de AASHTO y para la rehabilitación de puentes las especificaciones guía mencionadas. Se considera relevante señalar estas dos referencias, porque como se explica en la siguiente sección, ambas publicaciones resultan de proyectos de investigación e iniciativas impulsadas por las experiencias de los sismos ocurridos entre 1985 y 1995 a nivel mundial, entre estos el terremoto de Limón.

IMPACTO EN LAS ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES

La importancia del terremoto de Limón internacionalmente es evidente principalmente en tres aspectos: en las publicaciones realizadas en otros países sobre el evento, en los documentos en los que se menciona el terremoto de Limón y en los proyectos de investigación y en los cambios en la normativa justificados por los daños registrados como consecuencia del



Fig. 10: Desplazamientos permanentes en los apoyos provocados por el terremoto de Limón. En la fotografía A se muestra un desplazamiento en la dirección longitudinal del puente y en la fotografía B el desplazamiento transversal observados en el puente sobre el río Chirripó (Fotografías Unidad de Puentes, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales)

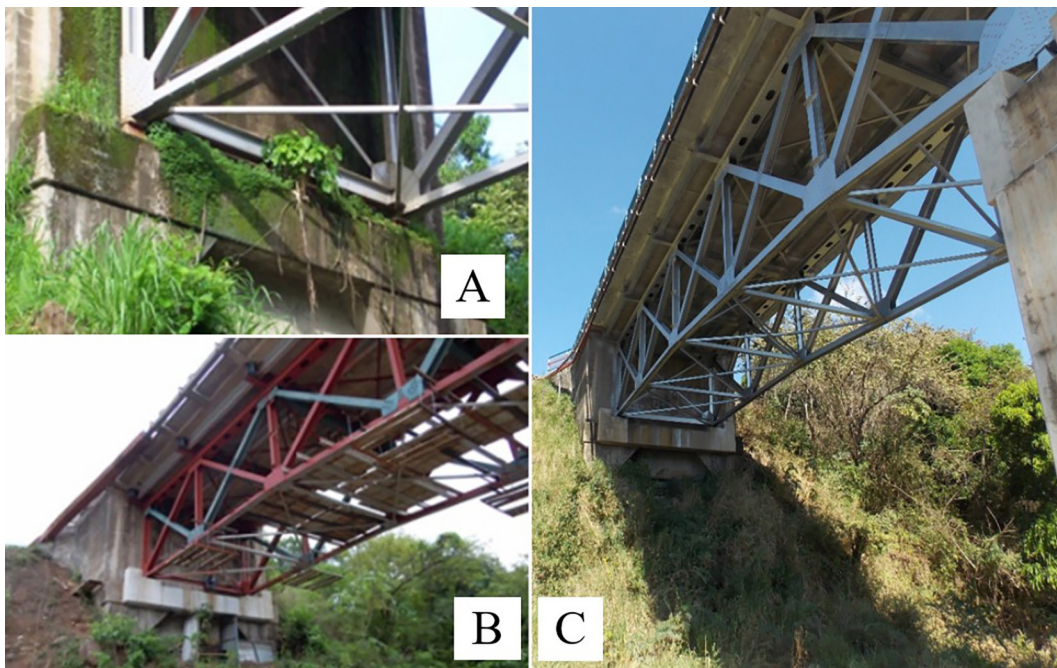


Fig. 11: Ejemplo de la aplicación práctica de los cambios en la normativa. En la fotografía A se muestra la longitud de asiento en el bastión del puente sobre el río Aranjuez en la Ruta Nacional 1. En la fotografía B se presenta el mismo bastión durante la ejecución de la rehabilitación a la que fue sometido el puente en el año 2011, en donde se observa que entre las medidas implementadas estuvo el incremento de la longitud de asiento de los elementos de la superestructura. La figura C muestra una vista del bastión en el año 2014 con el propósito de mostrar la condición después de finalizada la rehabilitación (Fotografías: Unidad de Puentes del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales).

terremoto. En esta sección no se pretende indicar todas las publicaciones relacionadas, pero se mencionan algunos ejemplos que permiten demostrar el impacto internacional del terremoto.

Algunos ejemplos de las publicaciones internacionales en las que se trata específicamente el terremoto de Limón son el reporte publicado por el *Earthquake Engineering Research Institute* en los Estados Unidos (EERI, 1991); la publicación de la descripción de los daños estructurales observados por Mitchell y Tinawi (1992) en Canadá; la publicación en Nueva Zelanda en el *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* de un reporte especial sobre los daños observados (Priestley, 1992) y las ponencias en conferencias internacionales como las presentadas por Youd et al. (1992) y Santana (1992) en la Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica y en la *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (Yasuda et al., 1993). Otro ejemplo notable es la mención de las fallas observadas en puentes en el terremoto de Limón en el libro especializado en diseño sísmorresistente de puentes por Priestley et al. (1996).

El interés internacional en el terremoto de Limón también se demuestra en las giras de reconocimiento en las que participaron expertos de diferentes países y de las cuales se publicaron reportes como los mencionados anteriormente (EERI, 1991; Mitchell y Tinawi, 1992), entre otros. Las giras de reconocimiento posibilitan la observación directa de los efectos de un sismo y proporcionan información básica para la investigación. Las visitas generalmente se realizan a los sitios afectados en un periodo cercano al evento, para recopilar la información y evidencias que permitan comprender las causas de los problemas existentes. Sin embargo, en el caso en estudio es importante mencionar que se reportan campañas de estudios en el sitio y nuevas investigaciones incluso después de diez y veinte años del evento, como reportan Franke y Rollins (2017). Los autores mencionan la realización de ensayos para determinar las propiedades geotécnicas de los materiales en los sitios de cimentación de varios de los puentes en los que se presentó licuefacción. También señalan que incluso después de más de 25 años del evento, la nueva información recopilada y el análisis de las fallas provocadas por el desplazamiento lateral del terreno y licuefacción en los puentes sobre el río Cuba, río Estrella y río Bananito demuestran que es posible obtener aún información útil para mejorar la comprensión de estos fenómenos.

Finalmente, se puede reconocer en los cambios en las recomendaciones para el diseño de *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design* de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2009) y en las recomendaciones para la rehabilitación de puentes *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures : Part 1 – Bridges* (FHWA-HRT-06-032) publicado por la *Federal Highway Administration* (Buckle et al., 2006), los resultados de la investigación realizada posterior a los terremotos de los años noventa. En ambas publicaciones, elaboradas por las agencias federales responsables de las carreteras de los Estados Unidos, se indica explícitamente que los terremotos ocurridos a nivel mundial en el decenio de 1985-1995 motivaron la revisión de las especificaciones de diseño de puentes en zonas de alta sismicidad. Además, se explica que las prácticas recomendadas presentadas en los documentos están basadas en la revisión e investigaciones motivadas por la comprobación del desempeño deficiente de los puentes ante la acción sísmica demostrada por los daños observados en los sismos severos. Esta afirmación se puede constatar por ejemplo en el prefacio de las especificaciones AASHTO mencionadas (AASHTO, 2009, p. v). En las recomendaciones para la rehabilitación de puentes, la experiencia adquirida en los terremotos en Costa Rica se menciona en el cambio en la filosofía de diseño (Buckle et al., 2006, p.6) y en las consideraciones que se deben tener en sitios en donde potencialmente podría producirse licuefacción (Buckle et al., 2006, p.438).

Las fallas observadas en los puentes también sirvieron para impulsar el desarrollo y uso de los métodos de análisis y diseño basados en desplazamientos. El comportamiento observado en los puentes contribuyó a demostrar que el diseño sísmorresistente basado en fuerzas no aseguraba un desempeño estructural adecuado y se subestimaban los desplazamientos producto de la acción sísmica (Priestley et al., 1996).

Además del cambio en el enfoque de diseño, un aspecto al que se le prestó especial atención en las normas de diseño y recomendaciones de rehabilitación sísmica fue a la reducción de la vulnerabilidad sísmica de los apoyos. Los apoyos de acero móviles y fijos son susceptibles a sufrir desplazamientos permanentes o perder el soporte. En la figura 10 se muestran dos casos en los que se observan desplazamientos permanentes en los apoyos provocados por la acción de los sismos. Ambas fotografías muestran el desplazamiento permanente existente en los apoyos de las vigas del puente sobre el río Chirripó en la Ruta Nacional 32 según reportan Vargas et al. (2014). Los desplazamientos permanentes de los apoyos del puente sobre el río

Chirripó ya habían sido identificados como daños provocados por el terremoto de 1991 en el informe final de las inspecciones realizadas por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica y la Agencia de Cooperación de Japón (JICA) como parte del proyecto “El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica” (Ministerio de Obras Públicas y Transportes y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2007).

Otra modificación evidente en las especificaciones de diseño de puentes fue la exigencia de verificar la longitud de asiento mínima requerida, ya que las pérdidas de soporte de las superestructuras podrían haberse evitado si se hubiera contado con la longitud de asiento necesaria o con dispositivos de sujeción apropiados. La exigencia de la verificación del cumplimiento del requisito de la longitud de asiento está explícita en las especificaciones AASHTO que se utilizan para el diseño de puentes a partir del año 1996 (Buckle et al., 2006). La verificación de la longitud mínima de asiento se indica en la sección 4.7.4.4 de las especificaciones de diseño de AASHTO vigentes (AASHTO, 2020). La fórmula que se utiliza para el cálculo considera la longitud de los tramos adyacentes, la altura de los bastiones o pilas, el ángulo de sesgo y la zona sísmica en la que se encuentre el puente. Esta fórmula empírica fue desarrollada específicamente para prevenir el colapso de los puentes por pérdida de soporte ocasionada por los movimientos longitudinales causados por los sismos (Buckle et al., 2006). En los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica, 2013) también se incluye este requisito. En la figura 11 se muestra un ejemplo de la adecuación de la longitud de asiento en un bastión como parte de la rehabilitación del puente sobre el río Aranjuez. Este ejemplo demuestra la incorporación en la práctica nacional de las medidas recomendadas para reducir la vulnerabilidad sísmica de los puentes.

CONCLUSIONES

El impacto del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 en Costa Rica no se limita a las pérdidas económicas y sociales ocasionadas por el evento sísmico y a las consecuencias inmediatas. La experiencia derivada de este evento impulsó diferentes iniciativas a nivel gubernamental, en la academia y en la práctica de la ingeniería que significaron un avance para el país.

El terremoto de Limón evidenció la total ausencia de preparación gubernamental y de la población ante un desastre natural. Sin embargo, según indica Bermúdez (2011) la experiencia adquirida en la atención de la emergencia fomentó la organización de los comités locales de emergencia y el desarrollo de programas de educación y prevención ante desastres.

Otro efecto positivo fue el impulso a la investigación en las áreas de ingeniería estructural y geotécnica y las mejoras en las prácticas constructivas en el país. El terremoto provocó daños significativos en diferentes tipos de estructuras, tales como edificaciones, acueductos, líneas férreas, vías y puentes. En el caso particular de puentes de carreteras ocurrieron colapsos totales y parciales de puentes como consecuencia de la licuefacción y desplazamientos del terreno, la existencia de longitudes de asiento de los elementos de la superestructura menores a los desplazamientos inducidos por la acción sísmica, la falta de continuidad entre los diferentes tramos de los puentes y la destrucción de las vías de acceso. Las fallas estructurales ocurridas demostraron la necesidad de la revisión de las prácticas constructivas de los puentes en zonas de alta sismicidad.

En la presente contribución se describió algunas de las modificaciones en la normativa de diseño estructural de puentes, tanto en Costa Rica como internacionalmente, que fueron establecidas con base en las investigaciones motivadas por las fallas observadas en los puentes como consecuencia del terremoto de Limón y otros sismos destructivos ocurridos en el período de 1985 a 1995. El propósito de presentar estos cambios en las especificaciones de diseño y construcción de puentes fue de demostrar el impacto del terremoto de Limón en el desarrollo de la ingeniería sismorresistente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (2009). *2009 LRFD Seismic Bridge Design with 2010 revisions*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

- Bermúdez, M. (2011). El manejo institucional y manejo de la población en el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial: Terremoto de Limón*, 211-224.
- Buckle, I., Friedland, I., Mander, J., Martin, G., Nutt, R. y Power, M. (2006). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges (FHWA-HRT-06-032)*. Virginia: Federal Highway Administration.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA). (1986). *Código Sísmico de Costa Rica 1986*. San José, Costa Rica: CFIA.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (2013). *Lineamientos para el Diseño Sísmorresistente de Puentes*. San José, Costa Rica: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.
- Dowrick, D. (2005). *Earthquake Risk Reduction*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Earthquake Engineering Research Institute. (1991). Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 Reconnaissance Report. *Earthquake Spectra*, 7 (Supplement B), 59-91.
- Franke, K. y Rollins, K. (2017). Lateral Displacement and Bridge Foundation Case Histories from the 1991 Magnitude 7.6 Earthquake near Limón Costa Rica. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6), 05017002. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001653
- Gutiérrez, J. (2012). Seismic Risk Prevention in Costa Rica: A Successful 39 Year Experience. Presentado en *Proceedings XV World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (2007). *El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Manuscrito inédito.
- Mitchell, D. y Tinawi, R. (1992). Structural damage due to the April 22, 1991 Costa Rican earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(4), 586-605. doi:10.1139/192-069
- Mora, S. y Yasuda, S. (2011). Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial: Terremoto de Limón*, 121-132.
- Morales, L. (1994). Daños causados por el terremoto de Limón: pérdidas y medidas de mitigación. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial: Terremoto de Limón*, 201-210.
- Muñoz Barrantes, J., Vega Salas, P., Vargas Alas, L., Chacón Alvarado, M., Barrantes Jiménez, R. y Loría Salazar, L. (2016). *Información de inventario para puentes en la red vial nacional de Costa Rica (LM-PI-UP-02-2016)*. San José: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Unidad de Puentes, Universidad de Costa Rica. Manuscrito inédito.
- O'Rourke, M. y Ballantyne, D. (1992). *Observations on water system and pipeline performance in the Limon area of Costa Rica due to the April 22, 1991 Earthquake. Technical Report NCEER-92-0017*. National Center for Earthquake Engineering Research. Buffalo: State University of New York at Buffalo.
- Priestley, M. (1992). Structural Damage Aspects of the April 22, 1991 Costa Rica earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 25(1), 17-36. doi: 10.5459/bnzsee.25.1.17-36

- Priestley, M., Seible, F. y Calvi, G. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470172858
- Santana, G. (1992). The April 22,1991 Limón (Costa Rica) earthquake. Presentado en *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, (pp. 7033-7038). Madrid, España.
- Sauter, F. (1994). Evaluación de daños en puentes y otras estructuras civiles causados por el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial: Terremoto de Limón*, 171-186.
- Vargas Alas, L. y Villalobos Vega, E. (2019). Condición estructural y de conservación de los puentes en rutas estratégicas de la red vial nacional costarricense: estado, causas y enfoques para atender el problema. Presentado en *Congreso Estructuras y Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica*. San José, Costa Rica.
- Vargas Alas, L., Agüero Barrantes, P., Chacón Alvarado, M., Barrantes Jiménez, R. y Loría Salazar, L. (2014). *Informe LM-PI-UP-PN21-2014 Inspección del puente sobre el Río Chirripó Ruta Nacional 32*. San José: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Unidad de Puentes, Universidad de Costa Rica. Manuscrito inédito.
- Yasuda, S., Watanabe, H. yoshida, N. y Mora, S. (1993). Soil Liquefaction During the 1991 Telire-Limón, Costa Rica Earthquake. Presentado en *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (p. 14). Saint Louis, Missouri.
- Youd, T. (1993). Liquefaction-induced damage to bridges. *Transportation Research Record*, 1411, 35-41.
- Youd, T., Rollins, K., Salazar, A. y Wallace, R. (1992). Bridge damage caused by liquefaction during the 22 April 1991 Costa Rica Earthquake. Presentado en *Proceedings 10th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 153-158). Kanpur; India.