

# REDUCCIÓN DE RIESGO A DESASTRES POR MEDIO DE CARRETERAS RESILIENTES: UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO<sup>1</sup>

Sheila Rimal Duwadi<sup>2</sup> y Jorge E. Pagán-Ortiz<sup>3</sup>

Resumen: Aunque el número de eventos peligrosos ha incrementado a nivel mundial, los avances en las ciencias y la ingeniería en infraestructura han permitido mejoras significativas en la construcción para lograr una infraestructura más resistente a estos eventos. A pesar de estos avances, todavía persisten las pérdidas económicas, daños y sufrimientos a los seres humanos. Cada evento peligroso presenta una situación única la cual nos reta y recuerda cuánto más necesitamos aprender. Aproximadamente 2,000 personas perdieron sus vidas durante el paso del huracán Katrina, mientras que el tsunami ocurrido en el Océano Índico en el 2004 causó la pérdida de 250,000 personas. Los peligros naturales y los inducidos por el hombre tienen una baja probabilidad de ocurrir y en tiempos de austeridad, ser proactivo en lugar de reactivo y desarrollar soluciones para mitigar daños y pérdidas, puede ser un reto. Sin embargo, las consecuencias de hacer poco o nada podrían ser peor. Este escrito expondrá el rol que el sistema de transportación vial tiene en la reducción de riesgos y vulnerabilidad a eventos peligrosos. Además, presenta un resumen del Programa de Investigación y Desarrollo para proveer una infraestructura vial más segura y resistente hacia peligros naturales o inducidos por el hombre que administra la Oficina de Investigación y Desarrollo de Infraestructura de la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Transportación de los Estados Unidos.

**Palabras clave:** explosión, inundación, puentes, seguridad, sísmico, socavación, transportación, viento

## DISASTER RISK REDUCTION THROUGH RESILIENT HIGHWAYS: A RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM

Abstract: Although the number of dangerous events has increased worldwide, advances in science and engineering infrastructure have enabled significant improvements in construction to achieve more resistant infrastructure to these events. Despite these advances, there are still economic losses, damages and suffering to human beings. Each hazardous event presents a unique situation which challenges and reminds us of how much more learning is needed. Approximately 2,000 people lost their lives during the pass of hurricane Katrina, while the tsunami in the Indian Ocean in 2004 caused the loss of 250,000 people. Natural and manmade hazards have a low probability of occurring and, in times of austerity, to be proactive rather than reactive and develop solutions to mitigate damages and losses can be a challenge. Nevertheless, the consequences of doing little or nothing could be worse. This paper will outline the role that the highway infrastructure system plays on reducing risk and vulnerability to hazardous events. In addition, a summary of the Research and Development Program to provide a safer and more resistant road infrastructure to natural or manmade hazards, administered by the Office of Infrastructure Research and Development of the Federal Highway Administration (FHWA) of the United States Department of Transportation is presented.

**Key words:** bridges, explosion, floods, safety, scour, seismic, transportation, wind.

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 16 de diciembre de 2012 y aceptado para publicación el 15 de enero de 2013.

<sup>2</sup> Líder, Equipo de Mitigación de Peligros, Oficina de Investigación y Desarrollo de Infraestructura, Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank, Federal Highway Administration, McLean, Virginia. E-mail: sheila.duwadi@dot.gov

<sup>3</sup> Director, Oficina de Investigación y Desarrollo de Infraestructura, Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank, Federal Highway Administration, McLean, Virginia. E-mail: jorge.pagan@dot.gov

## INTRODUCCIÓN

Cada año los Estados Unidos y el mundo entero experimentan numerosos peligros naturales y otros inducidos por el hombre, causando sufrimientos, interrupciones en las vidas de las personas y daños económicos. El huracán Sandy, que impactó el este de los Estados Unidos en octubre de 2012, causó devastaciones sin precedente y el costo de los daños causados por este sistema continúa en aumento. Contrario a otros eventos, los peligros naturales tienen la capacidad de afectar vastas extensiones territoriales. El huracán Sandy, fue moviéndose desde el Caribe hacia los Estados Unidos, impactando casi todo el este del país, desde las Carolinas hasta Maine.

Una infraestructura resistente es esencial para reducir el riesgo de desastres y es vital para mantener una economía robusta. Los renglones de vivienda, transportación y otras áreas de inversión usualmente sufren mayores daños durante un desastre natural. Los países en desarrollo pueden ser impactados por un desastre natural en forma desproporcionada debido, en parte, a que poseen una infraestructura frágil, lo que a su vez podría resultar en un mayor número de fatalidades. De acuerdo a la base de datos de Desastres Internacionales, la cual es mantenida por la Université Catholique de Louvain Brussels, el promedio de muertes causadas por desastres a nivel mundial fue de 106,887 personas durante el periodo del 2001 a 2010 (EM-DAT, 2009). En los Estados Unidos y otros países desarrollados, el mayor impacto ha sido de pérdidas y daños a la propiedad y no de muertes. El reporte de la Academia Nacional de Ciencias (ANC) titulado “Resistencia a Desastres es una Necesidad Nacional” indica que el impacto a la economía de los Estados Unidos en el 2011 excedió los \$55 billones con 14 de los desastres reportados excediendo \$1 billón en pérdidas cada uno. También se reportó que, mundialmente, el 2011 fue el año más costoso debido a los daños causados por desastres naturales con más de \$380 billones en pérdidas de las cuales sólo \$105 billones estaban aseguradas (Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters et al., 2012). El terremoto de magnitud 9.0 y su resultante tsunami cerca de la costa de Sendai en Japón el 11 de marzo de 2011 rebasaron los \$210 billones en daños, lo que los convierte en los desastres más costosos entre los años 1980 y 2011. El daño económico causado por los huracanes Katrina, Rita y Wilma en los Estados Unidos se reportó en \$176 billones (EM-DAT, 2009). El daño económico causado por el paso del huracán Sandy en los Estados Unidos aún no ha sido determinado, pero se proyecta que está entre los \$30 y \$50 billones.

Dónde se construye y cómo se reconstruye nuestra infraestructura tiene un impacto significativo en las comunidades. Debemos implantar prácticas efectivas para la reconstrucción que además sean conducentes a mejorar las comunidades y a reducir el potencial de daños a consecuencia de futuros desastres. Actualmente, más del 50% de la población en los Estados Unidos vive a 50 millas o menos de la costa y se espera que este porcentaje continúe incrementando en el futuro (Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters et al., 2012). No es suficiente tener un sistema establecido. Es necesario tener una planificación adecuada, con estrategias de reconstrucción, donde se utilicen tecnologías probadas, códigos y estándares, al igual que prácticas de reconstrucción para que la sociedad se beneficie de una infraestructura resistente a desastres. Tener un buen sistema de transportación es esencial para reducir el impacto de los desastres y es crítico para lograr un desarrollo sustentable.

El sistema de transporte vial es primordial en nuestras vidas diarias, tanto en situaciones cotidianas como durante eventos peligrosos y desastres, desempeñando un papel fundamental en el manejo de contratiempos provocados por estos acontecimientos. Durante desastres, el acceso al transporte vial es clave para la evacuación segura. Después del evento es imprescindible para el transporte de las brigadas de rescate y personal médico hacia lugares afectados y para el proceso de reconstrucción de las comunidades. Los daños causados por inundaciones y estragos en las carreteras y puentes, pueden alterar rápidamente una situación manejable y convertirla en un desastre, debido a que la restauración de servicios puede hacerse difícil. Tener acceso a medios alternativos para moverse tales como sistemas de transporte recreacional marítimo, líneas de trenes y otros modos es deseable, sin embargo, en muchos países estos medios de transporte no están disponibles, dejando el sistema de carreteras como la única alternativa razonable. Más de un tercio de las pérdidas causadas por un desastre mayor están directamente relacionadas con retrasos en la recuperación de flujo de los servicios críticos a una zona afectada.

La infraestructura de transporte vial en los Estados Unidos, en su mayor parte, no está asegurada, y depende, en su mayoría, de fondos públicos para su reparación y reconstrucción. Asignar fondos para minimizar el riesgo de desastres representa un gran reto para las autoridades, más aún cuando las necesidades de las agencias de transportación son cada vez mayores. Pero la alternativa de no asignar fondos para preparar adecuadamente la infraestructura para estos eventos puede ser devastadora y resultar en carreteras afectadas o intransitables al igual que en grandes pérdidas humanas y económicas.

Se enfatizará en este escrito la importancia de entender la complejidad de un sistema de transporte vial y su vulnerabilidad a eventos de riesgo y el enfoque del programa de investigación y desarrollo de la FHWA para entender y mejorar el sistema.

## LO QUE ESTÁ EN RIESGO

Los Estados Unidos cuentan con una vasta red abierta de carreteras. Este sistema incluye aproximadamente 47,000 millas de autopistas interestatales; 114,000 millas de otros tipos de carreteras en el sistema nacional; 4,000,000 millas de otros caminos y calles; 600,000 puentes; y 350 túneles (Chase et al., 2003). No todas estas instalaciones están al mismo nivel de riesgo de todos los peligros debido a que se encuentran en diversas zonas geográficas del país donde los riesgos considerados no tienen la misma probabilidad de ocurrir. Sin embargo, existe una probabilidad de que un número limitado de estos riesgos pueda ocurrir en un lugar determinado donde la vulnerabilidad de una estructura o de un sistema en particular sea propensa a varios eventos de riesgo, lo que permitirá identificar, evaluar e implementar medidas apropiadas para mitigar el riesgo. Como se mencionó anteriormente, los riesgos naturales tienen una probabilidad mayor de afectar a grandes áreas geográficas y por lo tanto, un número mayor de carreteras y puentes lo que pudiera tener un mayor impacto en los residentes afectados.

Los peligros naturales que pueden afectar las carreteras y puentes incluyen inundaciones costeras, terremotos, inundaciones, olas de calor, huracanes, deslizamientos de tierra, tornados, tsunamis, volcanes, incendios forestales y tormentas de invierno. Los eventos inducidos por el ser humano incluyen incendios, riesgos tecnológicos y el terrorismo. Entre los riesgos que pudieran afectar los puentes se encuentran los incendios, choques, sobrecargas, explosiones, entre otros (Duwadi, 2010). La Figura 1 muestra las regiones de los Estados Unidos susceptibles a distintos peligros.



**Figura 1: Mapa mostrando las regiones de los Estados Unidos susceptibles a varios tipos de peligros (adaptado del Comité de Infraestructura Crítica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, 2011).**

Además, no todos los sistemas viales, de verse afectados, producirán el mismo nivel de impacto debido a que algunos pueden ser reconstruidos con relativa facilidad o el tráfico puede ser redirigido hacia otros sistemas. Esto permite mantener un enfoque en las rutas y sistemas más esenciales, entiéndase aquellos que pueden ser o proveer conexiones críticas a la red vial y que podrían causar mayor daño físico o un efecto económico negativo mayor si están fuera de servicio.

Las estructuras viales de ciertos diseños, materiales y condiciones pueden estar en mayor riesgo de daño y ser más vulnerables a un peligro específico que a otros. Entender el comportamiento de los sistemas de puentes y el de sus componentes ante los eventos de riesgo es fundamental para desarrollar soluciones efectivas. En muchos casos, entender el comportamiento y desarrollo de soluciones puede llevar años de esfuerzo e investigación. Esto se ha

logrado hasta cierto punto para algunos riesgos, pero aún no se han elaborado soluciones para muchos otros peligros. Con cada evento importante, se aprenden nuevas lecciones lo que permite desarrollar nuevas normas y tecnologías.

El Inventario Nacional de Puentes (INP), el cual presenta una base de datos de los puentes en las vías públicas de los Estados Unidos, el Distrito Federal de Washington y Puerto Rico, ofrece algunas tendencias en el diseño de puentes. Datos de 1985 a 2001 muestran incrementos constantes en el largo de los segmentos de cobertura de puentes (19%), longitud total de la estructura (15%) y anchura de la cobertura (13%). Esta tendencia de puentes más largos y anchos puede producir estructuras más delgadas y menos redundantes mientras se extienden los límites de los materiales existentes (INP, 2012).

Los puentes son estructuras de ingeniería diseñadas para cargas específicas y generalmente están diseñados para tolerar cargas de gravedad y rara vez para fuerzas de levantamiento como, por ejemplo, fuerzas boyantes. Estas cargas y procedimientos se han desarrollado durante los años basados en la experiencia, la ciencia y la ingeniería. La carga que ve una estructura y la secuencia de carga varían según el tipo de diseño y el evento de peligro. Las fundaciones de un puente, sus pilastras y columnas son componentes críticos cuando se enfatizan las cargas sísmicas debido a que las fuerzas de terremoto se generan desde el suelo hacia la superestructura del puente. Los puentes con segmentos de cobertura largos y delgados son más susceptibles a cargas de viento y, por lo tanto, es importante que tengan una estabilidad aerodinámica. Un puente de cualquier tamaño, longitud y forma puede ser susceptible a inundaciones. Las fuerzas inducidas por oleajes pueden levantar un segmento del puente de su soporte como en el caso de los puentes gemelos en la autopista interestatal I-10 sobre el lago Pontchartrain en la ciudad de Nueva Orleans en el estado de Luisiana durante el paso del huracán Katrina, donde 38 segmentos del puente en dirección este fueron levantados de sus soportes por el oleaje cayendo al fondo del lago. Otros 170 segmentos de este puente fueron desalineados durante este evento. En el puente en dirección oeste otros 20 segmentos fueron levantados por el oleaje y cayeron al fondo del lago mientras unos 303 segmentos adicionales resultaron desalineados. (Duwadi, 2010).

Las subestructuras de un puente son también componentes vulnerables a cargas sísmicas y a socavación. Se desconocen las fundaciones de miles de puentes y esto incrementa la incertidumbre en torno a la vulnerabilidad e integridad de esas estructuras. Por otro lado, existen muchos puentes tipo tija o entramados en los Estados Unidos que son vulnerables a sobrecargas, incendios, explosiones y colisiones.

El hormigón y el acero son los materiales principales para la construcción de nuestros puentes. Otros materiales utilizados con menos frecuencia son la madera, el aluminio y los polímeros reforzados con fibra. La fuerza y la durabilidad de los materiales juegan un papel vital en la investigación de problemas de vulnerabilidad. Se están utilizando con más frecuencia materiales de acero y hormigón de mayor fortaleza y durabilidad en puentes nuevos. El comportamiento del material bajo carga de peligro, especialmente el de los nuevos materiales, aún tiene que ser investigado. Todos los materiales estructurales utilizados hoy día son propensos a daños causados por el fuego debido a que el calor puede cambiar las propiedades de un material. Las explosiones producen cargas de alta intensidad que pueden afectar el comportamiento del material.

Además del riesgo y el reto que tenemos de proteger nuestro sistema, debemos considerar también la condición actual de la infraestructura vial. Los puentes en los Estados Unidos están envejeciendo. Según el INP, la edad promedio de los aproximadamente 600,000 puentes en los Estados Unidos es de 46 años (2012). Muchos de ellos fueron construidos durante la década de 1960, la cual fue la época pico de construcción del sistema interestatal. Muchos de estos puentes han estado expuestos a aumentos de carga, aumentos en cantidad de tráfico cursado, y a cambios ambientales que no fueron considerados durante su diseño. En otras palabras, estos puentes están siendo sometidos a cargas imprevistas, como la sobrecarga de miembros a puntos mucho mayores que las cargas de fatiga, los ciclos de congelación-descongelación que no fueron considerados, las condiciones ambientales corrosivas y unas vidas de servicio no previstas durante la construcción.

## **ÁREAS DE ENFOQUE EN EL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO Y SUS CAPACIDADES**

El Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank de la FHWA realiza estudios para comprender y mejorar el sistema de carreteras de la nación. Sus científicos e ingenieros realizan investigaciones en muchas áreas, incluyendo el desarrollo de pavimentos y puentes de vida más prolongada, sistemas de transporte inteligente, productos que brindan seguridad en carreteras como barreras efectivas para la contención de vehículos, rótulos y

líneas en pavimento visibles y otras áreas importantes para la movilización efectiva y segura de usuarios de un destino a otro. Una de las áreas de enfoque es la mitigación de riesgo mediante el estudio de los efectos de riesgos específicos que afectan el sistema vial y el desarrollo de mejoras y prácticas dirigidas a proveer un sistema de transporte útil durante y después de un desastre natural o provocado por el hombre.

Existen medidas de mitigación que han sido efectivas para prevenir el colapso de puentes debido a eventos tales como inundaciones y socavación, vientos extremos y terremotos. Sin embargo, hay mucho más por hacer. El aumento en el uso de la información tecnológica, hace más vulnerable la infraestructura electrónica, la cual es necesaria para el manejo seguro y eficiente del flujo de tráfico. Además, es necesario tomar en consideración las necesidades del público a través de programas que administren y respondan a sus necesidades durante una emergencia. Para eso, es necesario permitirle al personal de emergencia y primeros auxilios el desarrollo de una planificación adecuada que permita a las autoridades responder efectivamente durante emergencias y desastres naturales. La FHWA está trabajando en todas estas áreas donde el transporte vial juega un papel vital.

El Programa de Investigación y Desarrollo en el área de mitigación de riesgo está dirigido a mejorar la seguridad de la infraestructura de carreteras y puentes. Se han establecido estrategias para desarrollar e implementar la planificación, análisis y diseño de metodologías para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura a daños físicos; para desarrollar e implementar estrategias y técnicas actualizadas para la mitigación de riesgo, adaptación y restauración; para desarrollar e implementar técnicas que nos ayuden en la toma de decisiones; y para promover tecnología que nos ayude a detectar y monitorear eventos, y desarrollar e implementar metodologías y guías para la evaluación de la seguridad de la infraestructura después de un evento de peligro. En definitiva, las estrategias en el área de mitigación de riesgo conducirán a mejorar el diseño, rehabilitación, monitoreo y evaluación, y metodologías y tecnologías de reparaciones o remplazos.

Estas estrategias están siendo atendidas a través de una serie de iniciativas que incluye:

- desarrollo de medidas de mitigación y adaptación de peligro para las estructuras nuevas y existentes
- desarrollo de técnicas y metodologías usadas para tomar decisiones durante la evaluación de riesgos a la infraestructura
- mejoras en la detección y tecnologías de vigilancia para la evaluación, prevención y mitigación de eventos extremos
- desarrollo de protocolos y técnicas de inspección para la evaluación rápida de las infraestructuras, después de un evento de riesgo
- diseños de estructuras inteligentes que puedan detectar daños y proveer activamente información estructural activa y semiactiva hacia los eventos de riesgo
- desarrollo de nuevos sistemas de infraestructura que puedan ser reparados y reconstruidos rápidamente después de un evento de peligro

Siempre que sea posible se utiliza un enfoque federal interinstitucional integrado que consolida las capacidades y aprovecha los recursos disponibles. A continuación se presenta un desglose de los aspectos más significativos de estudios en curso en las siguientes áreas:

- inundaciones y socavación
- inundaciones costeras
- peligros causados por los vientos incluyendo huracanes
- terremotos
- seguridad

## **Inundaciones, socavación e inundaciones costeras**

Las inundaciones y la socavación son las causas principales de fallas en los puentes en los Estados Unidos. Aproximadamente el 85% de las estructuras reportadas en el INP se encuentran sobre cuerpos de aguas. Desde principios de los años 90, las agencias estatales de carreteras han participado en un esfuerzo a nivel nacional para evaluar puentes sobre cuerpos de agua para determinar cuáles son más propensos o están en estado crítico de socavación. Los derrumbamientos del puente sobre el río Schoharie en 1987 en el estado de Nueva York y del puente sobre el río Hatchie en 1989 en el estado de Tennessee resultaron en que se prestara mayor atención a los problemas relacionados a socavación y en avances en el diseño de las fundaciones de puentes.

Los condados costeros en los Estados Unidos contienen alrededor del 50% de la población total de esta nación. Sin embargo, estos condados tan sólo representan el 20% del área de superficie geográfica de los Estados Unidos. Las zonas donde están localizados estos condados son propensas a riesgos costeros tales como lo son las inundaciones, huracanes y tsunamis (ver Figura 2).



**Figura 2: Daños causados por el huracán Katrina en los puentes gemelos de la autopista interestatal I-10 sobre el lago Pontchartrain en el estado de Luisiana (adaptado del Departamento de Transportación del estado de Luisiana).**

El Programa Nacional de Hidráulica de la FHWA continúa realizando estudios para avanzar el conocimiento de los efectos de crecientes de agua y la socavación y el de las tormentas costeras sobre nuestros puentes para asegurarse de que estas estructuras son confiables y no sufran daños o que al menos el daño sea mínimo durante fenómenos hidrodinámicos extremos. Con los recientes huracanes, las inundaciones de puentes costeros y los daños causados por las fuerzas de oleaje se han convertido en un aspecto importante. Las investigaciones se están realizando en gran medida a través del Programa de Investigación Hidráulica en el Laboratorio de Hidráulica J. Sterling Jones en el Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank (Kerenyi y Guo, 2010).

El Laboratorio de Hidráulica se ha capacitado para realizar pruebas de propiedades hidráulicas de puentes sumergidos y de estructuras de drenaje de carretera y de estructuras que cruzan cuerpos de agua (ver Figura 3). Este laboratorio puede utilizarse para resolver problemas de estabilidad de causas, elaborar normas de diseño para puentes en zonas de alto riesgo de inundación y contribuir a las normas de diseño para la socavación alrededor de las



pilastras de un puente y de un puente con loza sumergida. El laboratorio consiste de una planta física y de un centro de modelación numérico. La planta física ofrece un estanque de inclinación movable, un estanque para conducir estudios de equilibrio de fuerzas, un estanque de oleaje, una estación para conducir experimentos con imágenes velocimétricas y una instalación para pruebas de alcantarillas. El centro de modelación numérica incluye sistemas para realizar simulaciones basadas en cálculos de la dinámica de fluidos (FHWA, 2007).



**Figura 3: Vista de varios estanques de prueba del Laboratorio de Hidráulica J. Sterling Jones localizado en el Centro de Investigación Carreteras Turner-Fairbank en McLean, Virginia.**

Actualmente se realizan varios estudios para el desarrollo de mejoras en la capacidad analítica para calcular socavación en las pilastras y en los estivos de un puente y para contramedidas para proteger puentes interiores y costeros. También se realizan estudios conducentes a mejorar las capacidades de análisis y de modelación en la predicción de los efectos hidráulicos utilizados para la evaluación e inspección de contramedidas, y estudios para evaluar carreteras inundadas. A continuación se presenta una lista de los estudios que se realizan:

- ***Instrumento de Prueba de Socavación In Situ/Razón de Socavación.*** En este estudio se investiga la viabilidad de utilizar un instrumento de prueba de campo in situ para determinar la propensión a la erosión de los suelos alrededor de los cimientos del puente. Un instrumento de prueba in situ efectivo podría ayudar de un proyecto a otro. Este instrumento de campo podría definir con más precisión el potencial de socavación para un determinado conjunto de condiciones de diseño hidráulico.
- ***Socavación en Suelos Cohesivos/Prueba del Aparato para Medir Socavación Ex Situ (ESTD, por sus siglas en inglés).*** En este estudio se investiga la erosión incipiente de suelos cohesivos. La socavación en suelos cohesivos es un fenómeno muy complejo el cual aún no ha sido entendido completamente. Un aparato especial de erosión (ESTD) ha sido desarrollado para aplicar la carga hidráulica en una muestra de suelo cohesivo. El éxito de esta investigación dará lugar a un nuevo método de diseño que tendrá el potencial para predecir la profundidad de socavación con más exactitud en suelos cohesivos.
- ***Las Fuerzas de Flotación en Alcantarillas.*** Las fallas de alcantarilla ocurren con frecuencia cuando se sumerge la entrada y la salida de una alcantarilla con una burbuja de aire atrapada en el interior. Las fuerzas de flotación o de levantamiento pueden ser de tal magnitud que el sistema entero de la alcantarilla es empujado hacia arriba causando daños a la alcantarilla y a la carretera. Las fuerzas de levantamiento serán medidas y directrices de diseño serán desarrolladas mediante un estudio utilizando un sistema especial de equilibrio de fuerza.

- ***Cálculos de Fluidos Dinámicos (CFD) y Cálculos de Modelos Multi-Físicos para Analizar Peligros Hidráulicos (CMM).*** En colaboración con el laboratorio nacional de Argonne en el estado de Ohio, este estudio está enfocado en desarrollar y refinar los procedimientos para evaluar las fuerzas de inundaciones y oleaje en puentes; socavación alrededor de las fundaciones de puente, de manera individual y combinada; contramedidas para prevenir la socavación; diseños de puente que minimicen la vulnerabilidad a socavación; alcantarillas, incluyendo las pérdidas de flujo que podrían ocurrir en distintos tipos de geometría y superficie; facilidad de paso de los peces en alcantarillas; efectos del tipo de material en el lecho de un río en la socavación, incluyendo sedimentos cohesivos y de tamaño variado; efecto de la acumulación de maleza en la socavación; socavación de cama viva; y otros procesos que pueden afectar la seguridad del sistema de transporte o de minimizar los efectos adversos del sistema de transporte sobre el medio ambiente. Este trabajo analítico complementa el trabajo experimental realizado en el laboratorio de hidráulica.
- ***Respuesta de la Cubierta (Losa) del Puente al Oleaje/Oleaje de Tsunami.*** Las fuerzas de arrastre hidrodinámicas causadas por el oleaje u oleaje de tsunami, por las fuerzas de levantamiento causadas por oleajes u oleaje de tsunami y por los momentos causados por el oleaje u oleaje de tsunami causada en respuesta a la condición de la cubierta de un puente sumergida parcialmente y totalmente se estudiará en los estanques del laboratorio. La cubierta del puente se montará en un sistema con 2 grados de libertad que permitirá una respuesta libre horizontal y vertical en los modelos. La respuesta de la cubierta se medirá con cámaras de alta velocidad. Los resultados experimentales validarán los modelos computacionales y se desarrollará una guía.
- ***Influencia de Turbulencias Causadas Por Estructuras a Mayor Escala en Socavación.*** El proceso de erosión de los suelos será estudiado por el efecto causado por la influencia de altas turbulencias ocasionadas por estructuras. Las estructuras a escala mayor causan altas turbulencias las cuales desempeñan un papel importante en el proceso de socavación en pilastras. Las cargas hidráulicas turbulentas serán simuladas en el laboratorio usando un tubo generador de oleajes, donde muestras de suelo serán expuestas a las cargas hidráulicas oscilantes.
- ***Evaluación de los Daños Causados por Inundación de Pavimentos y Desarrollo de Tecnología y Mejores Prácticas.*** Existen pocas guías disponibles sobre cómo evaluar los pavimentos que son o han sido expuestos a inundaciones, si los vehículos pesados pueden atravesar una carretera inundada y de cuál sería la reducción de vida útil de pavimentos inundados. Este estudio incluye: la revisión de la literatura de métodos y prácticas actuales para la evaluación de los pavimentos que son o fueron inundados; identificar áreas donde falte ampliar conocimientos para evaluar la condición de los pavimentos; desarrollar tecnología y mejores prácticas para evaluar pavimentos mientras están inundados o poco después; y desarrollar tecnología y mejores prácticas para evaluar el impacto a largo plazo de la condición de inundación sobre el comportamiento del pavimento.

### **Peligros causados por los vientos incluyendo huracanes**

La estabilidad aerodinámica de puentes comenzó a recibir atención después del colapso del puente Tacoma Narrows en el estado de Washington en el año 1940 (ver Figura 4). Desde entonces, el campo de la ingeniería de viento ha evolucionado y abordado en numerosos problemas asociados con la interacción del viento y el ambiente en donde la estructura será construida.

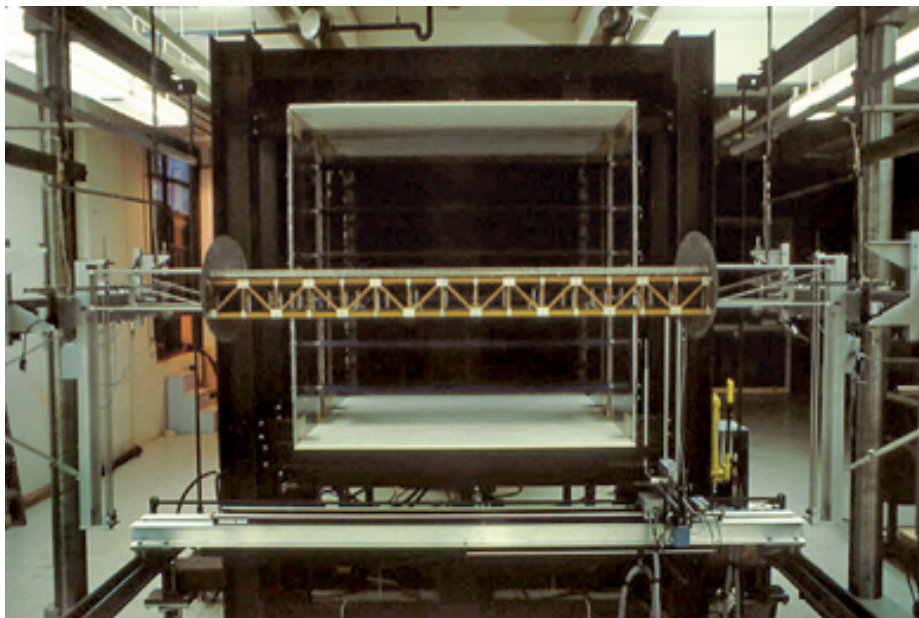
El Programa de Investigaciones en el área de aerodinámica de la FHWA está encaminado a adelantar nuestra comprensión de los efectos del viento en las estructuras de transporte, para asegurar que las estructuras mantengan un alto nivel de rendimiento bajo condiciones normales y para asegurar que las estructuras sean confiables y no sufran daño o que los daños sean mínimos durante eventos de viento extremos. Los investigadores en el Laboratorio de Aerodinámica en el Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank han desarrollado y aplicado una serie de medidas para la evaluación de la interacción viento/estructura y para el control de vibraciones causadas por el viento utilizando modelos de túneles de viento y pruebas de campo y monitoreo de estructuras reales. Según evolucionan los nuevos diseños de puente, surgen nuevas interrogantes tales como las vibraciones de la cubierta del puente y las vibraciones inducidas por el viento y la lluvia (Bosch, 2011).





**Figura 4: Colapso del puente Tacoma Narrows en el estado de Washington (Bosch, 2011).**

El Laboratorio de Aerodinámica es la única instalación en los Estados Unidos dedicada a conducir investigaciones utilizando un túnel de viento dedicado exclusivamente al estudio de los efectos del viento en estructuras de transporte (ver Figura 5). Al igual que el Laboratorio de Hidráulica, el Laboratorio de Aerodinámica tiene la capacidad para llevar a cabo modelos y pruebas físicas así como numéricas. El laboratorio posee un túnel de viento de gran escala tipo circuito abierto de velocidad baja y laminar, y otro túnel a menor escala que utiliza humo para la visualización de flujo. Estudios en este laboratorio han incluido el diseño del sistema de amortiguamiento para puentes tipo cable sostenido, pruebas en el túnel de viento para diseños nuevos o propuestos, evaluación de problemas de rendimiento y diseño de modificaciones, y análisis estático, dinámico y aerodinámico de puentes de segmentos largos (FHWA, 2001).



**Figura 5: Sección de cobertura de un puente siendo evaluado en el Laboratorio de Aerodinámica del Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank en McLean, Virginia.**

Actualmente se realizan estudios para desarrollar mejoras en las capacidades de análisis del efecto de viento y contramedidas para las estructuras que brindan soporte a puentes y carreteras a través de pruebas experimentales y para desarrollar mejores capacidades de análisis y modelos para predecir los efectos de peligro del viento y evaluar la efectividad de las contramedidas. Estos estudios se describen a continuación.

- ***Cargas por Viento y Efectos Sobre un Puente Atirantado por Cables.*** En este estudio se investiga la vibración inducida por el viento y la inestabilidad de los cables que sostienen un puente atirantado que frecuentemente produce colisiones entre los cables adyacentes, rompimientos de la losa de hormigón y fatiga de los tubos guía y de las cajas de anclaje. La investigación identificará los mecanismos que causan movimientos de tipo galopaje en los cables, las vibraciones causadas por la lluvia y el viento, y la aceleración paramétrica de cables. Se anticipa desarrollar métodos para estimar las cargas de viento y la predicción de rendimiento dinámico; y establecer criterios para la inestabilidad residual y desviaciones de tipo pico.
- ***Optimización de la Geometría de la Cobertura del Puente para Mejorar su Comportamiento Aerodinámico.*** El comportamiento aerodinámico de un puente de segmentos medianos y largos depende en gran medida, de la geometría de sección transversal de su cobertura. Varias secciones transversales de la cobertura de puentes se han convertido en las preferidas para los consultores de diseño estructural de puentes en América del Norte. Aunque los diseñadores han enfocado esfuerzos considerables en la producción de puentes que sean estructuralmente eficientes, han dedicado mucho menos atención a la optimización de rendimiento aerodinámico. Los detalles de las secciones típicas de cobertura serán enfatizados en este estudio y también se evaluarán modificaciones en las geometrías de la cobertura que podrían mejorar su rendimiento bajo las condiciones de viento esperadas.
- ***Influencia de la Torre de un Puente sobre el Tráfico y Cables.*** Las turbulencias de viento causadas por la presencia de las torres y los portales de un puente pueden causar ráfagas de viento inesperadas y afectar los vehículos que transitan a través de las torres o portales laterales del puente. Estas ráfagas también pueden causar inestabilidad aerodinámica en los cables de puente. Este estudio llevará a cabo las mediciones detalladas del flujo de viento alrededor de un modelo representativo de una torre para investigar el impacto de la turbulencia causada por la presencia de una torre de puente. Estas pruebas se realizarán en el Laboratorio de Aerodinámica usando una mesa giratoria para variar las direcciones del viento, así como dos robots equipados con sondas tipo Cobra para tomar las mediciones de velocidad en forma tridimensional.
- ***Estabilidad de Oscilación en Puentes de Segmentos Medianos y Largos.*** Los puentes de segmentos medianos y largos, especialmente los puentes que son relativamente flexibles y soportados por cables, pueden ser propensos a la inestabilidad causada por la oscilación de los cables que sostienen el puente. En la actualidad, no existen métodos puramente analíticos para predecir la velocidad crítica del viento en caso de oscilación. Este estudio identificará formas de mejorar los métodos experimentales corrientes para determinar el amortiguamiento aerodinámico de la oscilación y desarrollar mejores métodos analíticos para la predicción del comportamiento de oscilación en los puentes.
- ***Modelajes para Analizar Peligros Aerodinámicos: CFD (Cálculos de Fluidos Dinámicos) y CMM (Modelaje de Cálculos Multi-Físicos).*** Los procedimientos analíticos CFD y CMM (por sus siglas en inglés) que se desarrollarán incluyen: el análisis de fuerzas de viento en un tramo de un puente sencillo y en un tramo de puentes paralelos; las cargas de viento en los cables de un puente sencillo y de puentes paralelos, así como también las cargas de viento en todo el sistema de cables; los efectos de vientos transversales en camiones que transiten en puentes elevados; la influencia del tráfico en las cargas de viento y en la estabilidad de estructuras mayores; y otros procesos que pueden afectar la seguridad del sistema de transporte o minimizar los efectos adversos del sistema sobre el medio ambiente. Se utilizarán las instalaciones del Laboratorio Nacional de Argonne para el modelado.
- ***Fuerzas de Oscilación y de Oscilación Propia en Puentes de Segmentos Medianos y Largos.*** No es fácil predecir el comportamiento estructural de un puente a las cargas turbulentas de viento y la estimación de amplitudes galopantes en los cables o la inestabilidad causada por la oscilación de los cables utilizando medios puramente analíticos. Este estudio combina los resultados obtenidos en los

experimentos conducidos en el túnel de viento y nuevos modelos numéricos con el fin de desarrollar mejores instrumentos de análisis y diseño.

- ***Fuerzas de Viento Actuando en Cilindros Cónicos de Relieves Múltiples.*** Las estructuras que proveen soporte direccional al tráfico en las carreteras, tales como los soportes de las señales de tráfico y los postes de luz, están compuestas generalmente de miembros cilíndricos cónicos. Sólo existe información limitada en la literatura con respecto a las fuerzas de viento que actúan sobre estos elementos estructurales. Este estudio conduce experimentos en el túnel de viento utilizando un sistema de equilibrio de fuerzas duales únicas para compilar propiedades de las fuerzas que ejerce el viento en modelos representativos de estructuras con relieves múltiples. Los coeficientes de fricción que se obtengan a través de estos experimentos serán comparados con los valores presentados en las especificaciones estándar de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportación (AASHTO, por sus siglas en inglés).
- ***Presiones de Viento en Paneles para Señales de Mensajes Variados (VMS, por sus siglas en inglés).*** Los paneles para señales de mensajes variados son comunes en un gran número de las carreteras en los Estados Unidos. Los paneles en estructuras de señales variadas están expuestos a un tipo diferente de carga por viento que los paneles de señales comunes y se han detectado muchos problemas de rendimiento en los paneles de señales variadas. En este estudio se enfoca la medición de las presiones de superficie de viento en un modelo a escala 1:10 con respecto a una estructura actual de señales. Los experimentos en el túnel de viento se llevarán a cabo en el Laboratorio de Aerodinámica y los resultados serán comparados con las especificaciones estándar de AASHTO.

## **Terremotos**

Los terremotos pueden afectar grandes áreas causando daños catastróficos, pero no todas las regiones de los Estados Unidos son vulnerables a los terremotos. Geográficamente hay unas áreas más vulnerables a sismos. Según la Circular 1188 del “U.S. Geological Survey” titulada “An Assessment of Seismic Monitoring in the United States - Requirement for an Advanced National Seismic System”, 75 millones de estadounidenses en 39 estados enfrentan un riesgo significativo a terremotos (USGS, 1999). El Programa de Investigación Sísmica de FHWA está enfocado hacia las estructuras construidas en estas zonas de alto riesgo.

La FHWA ha participado en la investigación sísmica desde que ocurrió el terremoto de San Fernando en el estado de California en 1971. Sin embargo, no fue hasta que ocurrió el terremoto de Loma Prieta en el estado de California en 1989 que se puso mayor énfasis a nivel nacional en mejorar la infraestructura para confrontar riesgos sísmicos (ver Figura 6). Desde entonces, la investigación sísmica nos ha llevado a numerosos avances que han ayudado a diseñar, construir y modificar estructuras y puentes para que hacerlos más resistentes al efecto de los sismos.

El enfoque en los diseños resistentes a sismos ha incluido las fundaciones, columnas y pilastras debido a que representan los componentes críticos para este tipo de peligro. Las medidas desarrolladas e implementadas para garantizar la estabilidad en la superestructura durante un terremoto incluyen mejoras en el sistema de soportes, “restrainers” y anclajes. Un análisis comparativo de elementos finitos sofisticados y obtenidos luego de ocurrir un terremoto ha permitido ampliar nuestro conocimiento del efecto que tienen los movimientos de tierra en las estructuras. La FHWA colabora con varias organizaciones internacionales en la investigación e intercambio de información y tecnología sísmica (Yen, 2010).

Tras años de investigación, la FHWA desarrolló el Manual de Mejoras Sísmicas para Estructuras de Carreteras, Volumen I: Puentes (FHWA-HRT-06-032, 2006), y Volumen II: Muros de Contención, Túneles, Alcantarillas, Pavimento y Terraplenes en Pendientes (FHWA-HRT-05-067, 2004), los cuales están siendo usados por los departamentos de transportación estatales en los Estados Unidos. Además, la FHWA ha apoyado misiones de reconocimiento e investigación de terremotos. Ejemplos recientes incluyen la investigación en Chile tras el terremoto de Maule en febrero de 2010 y la investigación conducida en Japón posterior al gran terremoto de Japón en marzo de 2011.



H.G. Wilshire, U.S. Geological Survey

**Figura 6: Colapso de la autopista Cypress luego del terremoto de Loma Prieta en el estado de California en 1989 (adaptado de H.G. Wilshire, USGS).**

Otros estudios en proceso incluyen investigaciones en tecnologías innovadoras y desarrollo de aplicaciones para mejorar el comportamiento sísmico de los puentes de carretera que conduce la Universidad de Búfalo. Por otro lado, la Universidad de Nevada en Reno realiza estudios para mejorar la resistencia sísmica del sistema de carreteras que recibe fondos federales.

- ***Aceleración en la Construcción de Puentes en Zonas Sísmicas.*** La meta de este proyecto es estudiar y perfeccionar sistemas que puedan ser utilizados para la construcción acelerada de puentes en áreas propensas a terremotos. Se está estudiando el comportamiento de las subestructuras de un puente prefabricado, la superestructura y la construcción segmentada expuestas a sismos. El enfoque de este proyecto es en los detalles y en las conexiones en las juntas para garantizar la seguridad y el rendimiento antes, durante y después de un terremoto. Se espera poder desarrollar y demostrar a través de este proyecto un sistema de puente híbrido de hormigón segmentado post tensado que se desempeñe bien en regiones sísmicas. Las conexiones de los componentes de puentes prefabricados pueden ser vulnerables a los terremotos, y actualmente no se han realizado estudios para desarrollar buenos detalles de juntas.
- ***Tecnologías Innovadoras para la Protección Sísmica.*** Este proyecto consiste de múltiples estudios dirigidos a: mejorar el diseño y la aplicación para puentes con soportes tipo rodillo de aislación sísmica; generar una base de conocimientos que sirva para proyectar el comportamiento durante la vida útil integrando un sistema de protección sísmica; desarrollar un modelado de información de puente y un sistema de información para la construcción acelerada de puentes; investigar la posibilidad de adaptar los conceptos estructurales desarrollados y aplicados para edificios como una medida para mejorar puentes expuestos a sismos.
- ***Mejoras hacia Tecnologías Utilizadas para Estimar Daños Causados al Sistema de Carreteras.*** La FHWA ha dedicado años de esfuerzo hacia el desarrollo de sistemas de informática (“software”) que evalúen el riesgo sísmico de la red de transporte de carreteras. Uno de estos sistemas de informática conocido como “Risk from Earthquake Damage to Roadway System” (REDARS) está disponible para uso de la comunidad de transportación vial (FHWA/MCEER, publicación número MCEER-06-SP08).

Este proyecto busca mejorar la tecnología REDARS, su aplicabilidad y eficiencia, actualizar el modelo de fragilidad y reparación de puentes y el desarrollo de un módulo independiente titulado “REDARS Lite” que se concentrará exclusivamente en el cálculo de daños al puente dado una representación de “USGS Shakemap” de movimientos de tierra de un terremoto recreado. El módulo “REDARS Lite” se está desarrollando como un programa autónomo mediante la extracción de la versión modificada del procedimiento modelado de “HAZUS Bridge” que se encuentra en REDARS. Los resultados del análisis se presentarán en una tabla que resume los daños para cada puente en el INP (NBI, por sus siglas en inglés) con su respectiva latitud y longitud. Además, se producirán archivos “kml” y “shapefile” lo que permitirá ver los resultados en Google Earth.

- **Guías de Diseño en Funciones de Fragilidad.** Se están conduciendo estudios para determinar la respuesta sísmica de puentes horizontalmente curvados y desarrollar un conjunto de guías de diseño sísmico y funciones de fragilidad; estudiar puentes cercanos a fallas sísmicas y desarrollar recomendaciones para el diseño de puentes en las cercanías de fallas; y desarrollar funciones de fragilidad para puentes curvados, cercanos a fallas y otros puentes para incorporarlas en REDARS.

## Seguridad

Tras los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001, la seguridad de la infraestructura se convirtió en un dilema de gran visibilidad. En 2002, un panel convocado por AASHTO y FHWA comenzó a reunirse para desarrollar recomendaciones para responder a este nuevo tipo de riesgo. Las recomendaciones fueron completadas en el año 2003 y se publicaron en el reporte titulado “Recomendaciones para la Seguridad de Puentes y Túneles” (FHWA-IF-03-036, 2003). En un esfuerzo paralelo, la FHWA hizo un acercamiento a otras organizaciones interesadas en el tema y organizó un taller con el propósito de identificar las necesidades y carencias en el área de investigación de seguridad en la infraestructura. Este esfuerzo resultó ser la base de un plan de seguridad descrito en una publicación de la FHWA titulada “Multiyear Plan for Bridge and Tunnel Security Research, Development, and Deployment” (Duwadi y Chase, 2006).

La FHWA, junto a representantes de los departamentos de transportación estatales y de otros propietarios de la infraestructura vial, del Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos, y en colaboración con el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, ha participado en una serie de actividades para atender las deficiencias en seguridad en la infraestructura vial. El enfoque de la investigación se ha concentrado en desarrollar sistemas de protección para los componentes vulnerables de los puentes y en desarrollar programas computarizados para asistir en diseño. Aun cuando los estudios y las investigaciones han producido hallazgos significativos, todavía queda mucho por hacer para abordar seriamente esta cuestión. La instalación de barreras, cercas, portones, alumbramiento y cámaras de seguridad también pueden reducir la vulnerabilidad de amenazas hacia la seguridad de la infraestructura, pero estas medidas, por sí solas, no son siempre eficaces (Duwadi y Munley, 2011).

Existen varios estudios enfocados en desarrollar medidas de mitigación contra explosiones en puentes. Además, próximamente se iniciarán estudios para desarrollar diseños optimizados, contramedidas y capacidades analíticas para puentes sujetos a explosivos, y otras fuerzas peligrosas tales como sísmicas y de impacto, con el objetivo de diseñar una infraestructura resistente a múltiples eventos de riesgo. A continuación se describen los estudios:

- **Desarrollo de Contramedidas para Proteger las Torres de Puente Colgantes de Acero, Puentes Sostenidos por Cables y Cables de Sostén.** Desde el 11 de septiembre de 2001 se han hecho esfuerzos para comprender los fenómenos que ocurren durante una explosión y desarrollar contramedidas para proteger las torres de los puentes contra actos terroristas. Esta investigación se expande en este esfuerzo mediante el estudio de puentes de acero reales y detalles reales y refinar las contramedidas desarrolladas para torres de acero. Además, esta investigación incluye el desarrollo de medidas de mitigación para los cables principales del puente y cables de sostén. Se realizan investigaciones analíticas así como experimentales incluyendo pruebas reales en puentes siempre que sea posible.
- **Contramedidas para Cargos Puestas a Mano en Miembros de Puentes de Acero con Acceso Interior Abierto.** El objetivo de este proyecto es limitar el acceso interior a componentes de un puente parcialmente cerrado y prevenir la instalación de explosivos internos proveyendo medidas que



prevengan acceso interno, mientras que al mismo tiempo se permita el acceso para la inspección y preservación de la función original de diseño.

- ***Vulnerabilidad de los Puentes Sostenidos por Cables y sus Componentes de Conexión.*** Este estudio conlleva el desarrollo de nuevos detalles de diseño y modificaciones a puentes existentes sostenidos por cables para protegerlos contra actos terroristas. Este estudio complementa una iniciativa del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos para evaluar las vulnerabilidades potenciales de los cables y componentes de conexión mediante el desarrollo de modificaciones para puentes existentes.
- ***Definición de Cargas para Eventos de Impacto por Vehículos Pesados.*** Las especificaciones de los factores de carga y resistencia para diseño (LRFD, por sus siglas en inglés) presentados en AASHTO, especifican una fuerza estática equivalente de 400 kips como la carga de diseño para la colisión de vehículos pesados. La magnitud de esta fuerza de diseño fue establecida por la información disponible al momento en que se prepararon las especificaciones LRFD. Los resultados del estudio completado recientemente por el proyecto TPF-5(106) titulado “Guidelines for Designing Bridge Piers & Abutments for Vehicle Collisions” no presentaron una evidencia conclusiva para todos los escenarios críticos para justificar cambios en los requerimientos de AASHTO. Gran parte de los modelos teóricos y estudios paramétricos han finalizado. Esta investigación incluye experimentos de prueba para validar y calibrar modelos. Este estudio podría llevar a refinar la carga de diseño de impacto para vehículos pesados en puentes típicos (definición de la carga estática) y estructuras críticas o complejas (definición dinámica) y el desarrollo de un criterio de aceptación y de diseño que sea aceptable para AASHTO.
- ***Método de Prueba Estándar para Determinar las Propiedades de Nuevos Materiales y Revestimientos a Explosiones y Fuegos.*** Se necesita desarrollar un método estándar para evaluar e inspeccionar nuevos materiales con propiedades no convencionales. Las explosiones y el fuego imponen restricciones severas en el diseño. Este proyecto estudia una muestra de nuevos materiales y su comportamiento bajo cargas severas y se desarrollará un criterio de aceptación e inspección.
- ***Mejoras en la Redundancia y Alternativas para Cargas en Puentes Como Estrategia Para Mitigar Riesgos.*** Un puente importante nunca debe colapsar como resultado del fallo de sólo uno de sus miembros estructurales independientemente del tiempo que haya estado en servicio. El diseño de estructuras para cambios futuros de cargas es un reto que puede ser sobrepasado si se considera el paso alterno de cargas y redundancia en el diseño del puente. Existe la necesidad de mejorar nuestra metodología de diseño en cuanto a redundancia y el paso alterno de cargas como estrategia de mitigación de riesgo. Este estudio cuantificará la redundancia de un puente mediante la investigación de diferentes tipos de puentes y sistemas, desarrollará una lista de elementos importantes y redundantes para cada tipo de puente, definirá la relación entre redundancia y seguridad general del puente, investigará la relación entre diferentes riesgos y estudiará los efectos de modificación en la redundancia de puentes existentes. Esta investigación producirá múltiples informes de cada una de las fases y una documentación general. Los resultados de esta investigación tienen el potencial de impactar significativamente el diseño actual de puentes.

## CONCLUSIONES

Aún quedan muchos retos para reducir los riesgos y daños causados por eventos peligrosos naturales e inducidos por el hombre hacia la infraestructura. Se ha expuesto en este escrito cómo la FHWA, a través de su Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank, continúa abordando algunos de estos retos para que el impacto de un evento, en caso que ocurra, se reduzca o se mitigue. Aunque actualmente la FHWA no está concentrada en estudiar todos los riesgos, se están haciendo avances significativos para desarrollar soluciones viables para atender varios eventos de riesgo que están impactando el sistema. Una sola solución no satisface todos los riesgos de peligro debido a que cada evento imparte cargas sobre una estructura con una magnitud, dirección y ubicación diferente. Aunque es deseable tener un enfoque que aplique a múltiples eventos de riesgo combinados, este enfoque no siempre es factible.

A través de los años, las investigaciones llevadas a cabo en el Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank han tenido éxito en el desarrollo de pruebas e implementación de medidas para proteger la infraestructura



de carreteras de eventos de riesgo. Sin embargo, queda mucho por hacer, pues cada nuevo evento trae importantes lecciones. El programa que se está implementado en el Centro de Investigación de Carreteras Turner-Fairbank se concentra en los aspectos de ingeniería con el fin de incorporar resistencia a desastres en la construcción de infraestructura antes de que ocurra un evento catastrófico. La meta del Programa es producir un sistema de transporte inmune a los vientos huracanados, terremotos, inundaciones y socavación, terrorismo y cualquier otra condición de peligro y proveer resistencia a daños para que el sistema restablezca su servicio rápidamente después de un evento.

La transportación vial juega un papel fundamental en el desarrollo social y económico de un país. Un buen sistema de transporte no es tan sólo una parte inherente para la reducción de los desastres, pero también es esencial para mantener el desarrollo económico. Aunque como sociedad a menudo somos reactivos a las situaciones, es imprescindible ser proactivos y desarrollar soluciones para minimizar el sufrimiento debido a la pérdida de vidas y otros recursos. Aunque el número de eventos de riesgo ha aumentado, las muertes relacionadas a desastres han disminuido en los países desarrollados, lo que se atribuye en gran medida a mejoras en la construcción y a la implantación de medidas proactivas desarrolladas a través de la investigación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecemos las contribuciones de los siguientes miembros del equipo de Mitigación de Peligros de la Oficina de Investigación y Desarrollo de Infraestructura de la FHWA: Harold Bosch, Dr. Kornel Kerenyi, Frank Jalinoos, Eric Munley y Dr. Phillip Yen. Los autores también agradecen la colaboración de la Sra. Agnes Vélez, de la Oficina de Programas Internacionales de la Administración Federal de Carreteras, en la traducción de este artículo al español.

## **REFERENCIAS**

- Bosch, H. R. (2011). "Winds, Windstorms, and Hurricanes", *Public Roads Magazine*, Vol. 74, No. 4, pp. 14-23.
- Chase, S. B., Duwadi, S. R. y Hooks, J. M. (2003). "Getting Ahead of the Curve", *Public Roads Magazine*, Vol. 67, No. 3, pp. 2-7.
- Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters, Engineering and Public Policy Committee on Science y The National Academies (2012). *Disaster Resilience: A National Imperative*, The National Academies Press, Washington, D. C.
- Duwadi, S. R. (2010). "Hazard Mitigation R&D Series: Article 1 – Taking a Key Role in Reducing Disaster Risks", *Public Roads Magazine*, Vol. 73, No. 6, pp. 20-25.
- Duwadi, S. R. y Chase, S. B. (2006). "Multiyear Plan for Bridge and Tunnel Security Research, Development, and Deployment", FHWA-HRT-06-072, Federal Highway Administration, United States Department of Transportation.
- Duwadi, S. R. y Munley, E. (2011). "Hazard Mitigation R&D Series: Article 5 – Securing the Nation's Bridges", *Public Roads Magazine*, Vol. 74, No. 6, pp. 20-27.
- Emergency Events Database – EM-DAT (2009). Office of Foreign Disaster Assistance, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain, Bruselas, Bélgica.
- Federal Highway Administration – FHWA (2001). "Aerodynamics Laboratory Fact Sheet", FHWA-RD-01-111, United States Department of Transportation.
- Federal Highway Administration – FHWA (2007). "Hydraulics Laboratory Fact Sheet", FHWA-HRT-07-054, United States Department of Transportation.
- Inventario Nacional de Puentes – INP (2012). Office of Bridge Technology, Washington, D. C.
- Kerenyi, K. y Guo, J. (2010). "Hazard Mitigation R&D Series: Article 2 – Scour, Flooding and Inundation", *Public Roads Magazine*, Vol. 74, No. 1, pp. 30-35.

United States Geological Survey – USGS (1999). “An Assessment of Seismic Monitoring in the United States - Requirement for an Advanced National Seismic System”, Circular 1188.

Yen, W. P. (2010). “Earthquake!”, *Public Roads Magazine*, Vol. 74, No. 2, pp. 26-33.