

Anexo Técnico

PROGRAMA DE RESILIENCIA CLIMÁTICA DE LA
INFRAESTRUCTURA DE PUENTES EN REPÚBLICA DOMINICANA
(DR-L1166)

Mantenimiento de la Infraestructura de Puentes



1. Contexto de los Proyectos del MOPC

El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de la República Dominicana (MOPC) implementa desde hace más de 10 años, para el mantenimiento de infraestructura especialmente vial, Contratos Viales Basados en Resultados y Desempeño (CVBRD) que están diseñados para aumentar la eficiencia y eficacia de la gestión y el mantenimiento de activos. En estos contratos, se paga por condiciones de servicio, en donde se pactan a precios globales fijos por llevar por ejemplo los caminos, a un nivel de servicio determinado y mantenerlo bajo estos mismos estándares durante un período de tiempo (18-36 meses). Los criterios de desempeño para el pago por lo general están asociados a medidas de disponibilidad y comodidad para el usuario, durabilidad de la vía y desempeño de la gestión.

En la actualidad, se desarrolla también el programa comunitario “Peón Caminero”, que durante 2021 intervino cerca de 500 km y generó 493 empleos a nivel local. Aunque estos tipos de contratos presentan resultados positivos, los recursos destinados al mantenimiento vial (aprox. 0,08% PIB anual entre 2016 - 2018) son limitados y se priorizan sin las herramientas tecnológicas que permitan una planificación y gestión de los activos que optimicen las intervenciones de acuerdo con las necesidades más costo-efectivas.

Para el caso de los puentes las intervenciones se han manejado de forma diferente y muchas de las acciones de mantenimiento han surgido de necesidades puntuales

identificadas a partir de inspecciones realizadas por funcionarios del MOPC, o después de eventos climáticos extremos que hacen necesaria la realización de trabajos específicos de mantenimiento para garantizar la adecuada disponibilidad.

Consciente de la necesidad de mejorar la adecuada gestión y mantenimiento de la infraestructura de puentes, el MOPC liderado por su Departamento de Puentes, busca generar mecanismos y estrategias para hacer más eficiente su labor; por lo cual a través del presente programa se buscará entre otros, la implementación de un sistema de gestión de puentes que incluya módulos específicos asociados con el mantenimiento periódico y rutinario. Adicionalmente, se realizarán tareas de capacitación de personal, enfocadas en la socialización del nuevo Reglamento de Puentes, desarrollado con el apoyo del Banco.

Finalmente y con el objetivo de replicar las buenas prácticas obtenidas con el desarrollo de CVBRD, se buscará adaptar su ejecución para el caso de los puentes. Para esto dentro del presente anexo se pretende identificar buenas prácticas, lineamientos y recomendaciones en términos de gestión de mantenimiento para puentes, que puedan ser replicables a futuro dentro de la ejecución del programa, ya sea en el marco de la aprobación del Reglamento de Puentes o dentro de las acciones de fortalecimiento para la gestión del OR (Componente III).



2. Importancia del mantenimiento de puentes



Según la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, por sus siglas en inglés), un puente es *“una estructura que incluye soportes erigidos sobre una depresión o una obstrucción, como agua, carretera o ferrocarril, y que tiene una vía o pasaje para transportar tráfico u otras cargas móviles, y que tiene una abertura medida a lo largo del centro de la calzada de más de 20 pies”*.

Los puentes deben ser diseñados para estados límite, especificados para lograr los objetivos de constructibilidad, seguridad y servicio, con el debido respeto de estándares respecto de su inspección, economía y estética.

Funcionalmente, son simplemente una parte especial de la red vial en la red de transporte. Sin embargo, son un eslabón crítico en la red de carreteras, y por lo tanto se consideran por separado del mantenimiento de las carreteras que los rodean. Dado que los puentes también representan una gran inversión de capital por unidad de longitud de carretera, se puede justificar un alto nivel de sofisticación en su mantenimiento (Maintenance Manual for Roadways and Bridges, 2007. American Association of State Highway and Transportation Officials.)

Debido a su alto costo, los puentes representan una inversión importante para los propietarios y operadores de carreteras. Para evitar los riesgos y las consecuencias

del colapso de un puente, se requiere que los propietarios y operadores mantengan sus puentes en buen estado. En los Estados Unidos, estas acciones se conocen como preservación de puentes.

Según el reglamento de puentes de la República Dominicana, los puentes para carreteras y caminos deben ser diseñados para mantener su desempeño a lo largo de una vida útil de 50 años correspondiente al período de tiempo durante el cual se espera que el puente esté en funcionamiento.

Según la FHWA, la preservación de puentes comprende acciones o estrategias que previenen, retrasan o reducen el deterioro de los puentes o sus elementos, restauran la funcionalidad de los puentes existentes, los mantienen en buenas condiciones y prolongan su vida útil.

Existen dos tipos de mantenimiento de puentes:

- **Mantenimiento preventivo o rutinario:** acciones que se toman para evitar o reducir el deterioro debido a condiciones ambientales o al uso de los usuarios.
- **Mantenimiento sustancial:** acciones que se toman para reparar daños causados por deterioro, uso o accidentes de tráfico.

Los puentes pueden ser identificados como deficientes por una o ambas de las siguientes razones: deficiencia estructural y deficiencia funcional. Pueden volverse estructuralmente deficientes debido a la corrosión o deterioro del concreto asociado con el desgaste y la degradación ambiental, cuyos efectos pueden reducirse mediante un buen mantenimiento de puentes. Un puente también puede ser estructuralmente deficiente porque las cargas de vehículos están superando la capacidad de diseño del puente, un problema para el cual el mantenimiento no puede hacer nada más que establecer y monitorear los límites de carga.

Los puentes se vuelven funcionalmente deficientes cuando algún aspecto del diseño o tipo de estructura ya no es apropiado para manejar el tráfico debido a problemas dimensionales o geométricos. Las actividades de mantenimiento de puentes no pueden abordar las deficiencias funcionales.

El mantenimiento preventivo de puentes se enfoca en realizar actividades que preservarán los componentes del puente en su condición presente (o prevista), evitando el desarrollo de una deficiencia estructural. Las actividades de mantenimiento preventivo se pueden clasificar en dos grupos: programadas y de respuesta.

- **Programadas (realizadas a intervalos):** Las actividades típicas que se realizan en intervalos programados incluyen limpieza de tableros, asientos, tapas y zonas afectadas por sal; limpieza de sistemas de drenaje de puentes; limpieza y lubricación de ensambles de rodamiento de expansión; y sellado de tableros de concreto o elementos de la subestructura.
- **Respuesta (realizadas según sea necesario y según se identifiquen durante el proceso de inspección):** Las actividades típicas que se realizan según sea necesario incluyen re-sellado de juntas de expansión; pintura de elementos estructurales de acero; remoción de escombros de canales fluviales; reemplazo de superficies de desgaste; extensión o agrandamiento de desagües de tablero; y reparación de daños causados por un vehículo que golpea la estructura.

El concepto de mantenimiento preventivo de puentes sugiere que se realizan muchas reparaciones y actividades relativamente pequeñas para mantener el puente en buen estado y evitar gastos importantes en una rehabilitación mayor o en la sustitución del puente.

Las tareas que involucran el mantenimiento de un puente dependen directamente del tipo de estructura, del momento en el ciclo de vida, del estado de la estructura y de las condiciones del entorno.

El rendimiento de los puentes se deteriora continuamente con el tiempo debido a cargas externas y condiciones ambientales. Este proceso de deterioro continuo es causado por la reducción de la resistencia y/o el aumento de los efectos de carga (Fisher 1984; Fisher et al. 1998; FHWA 2013b; NCHRP 2005, 2006). En general, la fatiga en puentes de acero y la corrosión en puentes de hormigón armado se han tratado como los principales mecanismos de deterioro que reducen la seguridad de los puentes con el tiempo. Para predecir el deterioro del rendimiento de los puentes, es necesario modelar adecuadamente la propagación del daño por fatiga y/o corrosión (Kim et al. 2013; Frangopol and Kim 2019). La evaluación y predicción del efecto de carga inducido por el tráfico en los puentes también es esencial. Para la modelización de carga en vivo, se deben considerar la ocurrencia y la magnitud de la carga en vivo utilizando enfoques probabilísticos apropiados (Nowak 1999; NCHRP 2004).

Predicción del daño por fatiga

La predicción del daño por fatiga se refiere al proceso mediante el cual se estima el deterioro causado por cargas repetidas en ubicaciones sensibles a la fatiga, como conexiones mecánicamente unidas con soldadura, remaches y pernos en estructuras de acero (Haghani et al., 2012; Alencar et al., 2019). La iniciación y propagación del daño por fatiga se ven afectadas por las condiciones de carga, la geometría y las propiedades del material de los detalles sensibles a la fatiga, así como por los

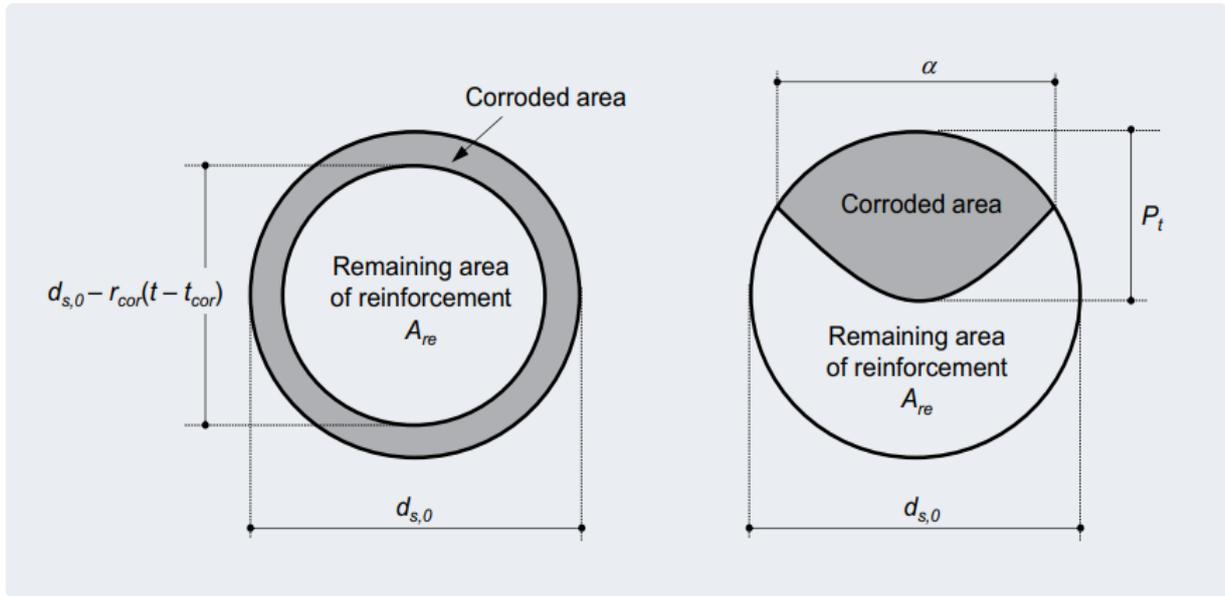
defectos iniciales (Fisher, 1984; Li et al., 2016). El daño por fatiga puede expresarse en términos del número acumulativo de ciclos y del tamaño de la grieta por fatiga (Hashin y Rotem, 1978; Hwang y Han, 1986).



Predicción de la Propagación de la Corrosión

La corrosión en puentes de hormigón armado afecta al deterioro del rendimiento estructural al reducir el área de sección transversal y la resistencia de adherencia del refuerzo en el hormigón (Arora et al. 1997; NCHRP 2005, 2006). El proceso de corrosión en puentes de hormigón armado está principalmente causado por la penetración de cloruro en el hormigón y la carbonatación del hormigón (Roberge 1999). En general, el proceso de deterioro por corrosión consta de seis pasos (Thoft-Christensen 2003): (a) penetración de iones de cloruro en la estructura de hormigón; (b) iniciación de la corrosión del refuerzo; (c) evolución de la corrosión; (d) iniciación de grietas en el hormigón; (e) propagación de grietas; y (f) desprendimiento.

Figura 1. Modelo de corrosión uniforme y localizada



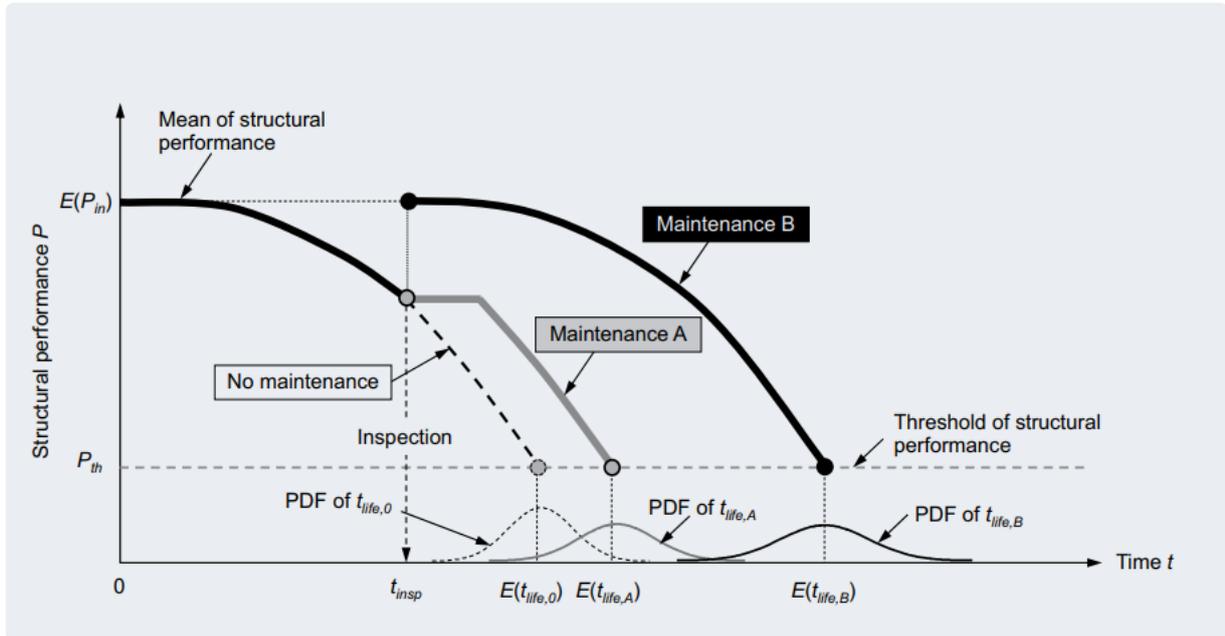


3. Efectos de la inspección y el mantenimiento en el rendimiento y vida útil de los puentes



El rendimiento estructural se deteriora continuamente con el tiempo. Para mejorar el rendimiento estructural y extender la vida útil, se aplican acciones de mantenimiento (Sánchez-Silva et al., 2016). Los tipos de mantenimiento apropiados se determinan en función de los resultados de las inspecciones (Kim et al., 2013; Frangopol y Kim, 2019). Los efectos de la inspección y el mantenimiento en el rendimiento estructural y la vida útil, considerando la incertidumbre asociada con la propagación del daño y los resultados de la inspección, se ilustran en la Figura 2. Cuando la inspección se realiza en el tiempo t_{insp} y no se detecta daño, o si el daño detectado no requiere mantenimiento, no habrá mejora en el rendimiento estructural ni extensión de la vida útil. Según el tipo de mantenimiento después de la detección del daño, la mejora del rendimiento estructural y la extensión de la vida útil variarán. La aplicación del mantenimiento preventivo A en la Figura 2 resulta en un retraso en el deterioro del rendimiento estructural y un aumento en la vida útil inicial media $E_{(tlife,0)}$ proporcionada por la diferencia $E_{(tlife,A)} - E_{(tlife,0)}$. Como se indica en la figura, $E_{(tlife,0)}$ se extiende a la vida útil media $E_{(tlife,B)}$ después de la aplicación del mantenimiento esencial B.

Figura 2. Efectos de la inspección y mantenimiento en rendimiento estructural y su vida útil



El mantenimiento y reemplazo de los componentes del puente pueden mejorar el rendimiento del puente y extender su vida útil. Sin embargo, estas acciones pueden ser muy costosas. Con recursos financieros limitados, el costo del mantenimiento y reemplazo de los componentes del puente debe asignarse adecuadamente (Frangopol 2011; Frangopol and Soliman 2016; Frangopol et al. 2017).



4. Inspección y monitoreo de salud estructural

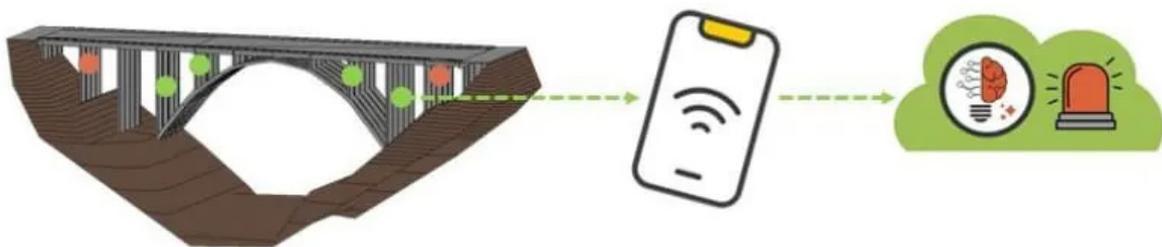


Las principales dificultades asociadas a la evaluación de la seguridad de los puentes y la optimización de la gestión de la vida útil están generalmente relacionadas con las incertidumbres asociadas a la predicción de la ocurrencia y propagación del daño, y el rendimiento del puente (Biondini y Frangopol 2016; Frangopol y Soliman 2016). Para reducir las incertidumbres epistémicas en la gestión de puentes, y para prevenir la inservibilidad inesperada y el fallo estructural de puentes en deterioro, la inspección y el monitoreo de salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) deben aplicarse de manera adecuada (NCHRP 2006; Verma et al. 2013; Copelan 2014). Las técnicas de inspección y SHM se han aplicado para diversos propósitos, como la detección e identificación oportuna de daños, la evaluación y predicción precisa del estado, y la aplicación de resultados de inspección y SHM para la evaluación y predicción efectivas y eficientes del rendimiento del puente (Okasha y Frangopol 2012; Frangopol et al. 2008a, 2008b). Por lo tanto, es esencial comprender el papel de la inspección y el SHM en el apoyo a la toma de decisiones racional para la seguridad y la gestión de la vida útil de los puentes.

Aplicaciones de la inspección y el monitoreo para la gestión de puentes

Los principales propósitos de la aplicación de inspección y SHM para puentes deteriorados incluyen: (a) evaluación del estado, (b) detección e identificación de daños y ubicación de ubicaciones críticas, y (c) recopilación de datos para una gestión precisa y confiable del rendimiento y vida útil del puente (Frangopol et al.,

2008a, 2008b). En las últimas décadas, se han desarrollado diversas técnicas de inspección y SHM, así como métodos extensos de procesamiento de datos, para mejorar la eficiencia y efectividad de la gestión de puentes (Martinez-Luengo et al., 2016; Seo et al., 2016; Ostachowicz et al., 2019). Las técnicas de inspección y SHM incluyen pruebas no destructivas, sistemas SHM basados en vibraciones, basados en deformaciones, basados en visión y GPS (Seo et al., 2016; Xu y Brownjohn, 2018). Junto con el desarrollo de técnicas avanzadas de inspección y SHM, aumenta la demanda de integrar la información de inspección y SHM en la evaluación y predicción del rendimiento estructural, y en la gestión del ciclo de vida de puentes deteriorados (Frangopol y Soliman, 2016).



Métodos de inspección

La inspección no destructiva (NDI) es uno de los métodos más representativos para evaluar el daño y la condición de puentes deteriorados. Los resultados de la inspección dependen de los métodos aplicados, la experiencia y habilidades de los inspectores, y las condiciones ambientales donde se realiza la inspección (Washer et al., 2014; Campbell et al., 2020). Los requisitos esenciales de los procedimientos y la frecuencia de inspección, las calificaciones de los inspectores y la documentación de los resultados de la inspección se recomiendan en FHWA (2004, 2012) y AASHTO (2017b). En general, se recomienda que la inspección de puentes se realice a intervalos uniformes de dos años, considerando la condición actual del puente y el progreso esperado del deterioro.

Hormigón armado

Los métodos de inspección para puentes de hormigón armado (RC, por sus siglas en inglés) incluyen técnicas no destructivas representativas como la inspección por velocidad de pulso ultrasónico (UPVI), inspección por eco de impacto (IEI), inspección por emisión acústica (AEI) y inspección radiográfica (RI). El UPVI analiza la amplitud y el tiempo de viaje de la onda acústica para evaluar la condición del hormigón, pero requiere acceso a ambos lados del elemento del puente. La IEI utiliza una onda de estrés generada por impacto y puede aplicarse desde un solo lado del elemento del puente, pero su fiabilidad disminuye con el grosor del elemento. La AEI, tradicionalmente utilizada para detectar grietas en puentes de acero, ha sido desarrollada para puentes de RC, pero requiere algoritmos de procesamiento de datos adecuados para filtrar ruidos. La RI puede detectar daños en refuerzos y cables de pretensado, así como vacíos en el hormigón, pero requiere más tiempo y costo de inspección para miembros de hormigón más gruesos. La elección del método de inspección adecuado debe considerar el tipo de daño, la accesibilidad, el costo y la probabilidad de detección del daño.

Los métodos de inspección para puentes de concreto reforzado (RC, por sus siglas en inglés)

La fisuración inducida por la corrosión es uno de los principales daños que afectan el rendimiento estructural de los puentes de RC (NCHRP 2006). Las técnicas representativas de Inspección No Destructiva (NDI, por sus siglas en inglés) para evaluar la condición de los puentes de RC incluyen la inspección de velocidad de pulso ultrasónico (UPVI, por sus siglas en inglés), inspección de eco de impacto (IEI, por sus siglas en inglés), inspección de emisión acústica (AEI, por sus siglas en inglés), e inspección radiográfica (RI) (IAEA 2002; Washer 2014).



- **UPVI:** El UPVI puede evaluar la condición del concreto mediante el análisis de la amplitud y el tiempo de viaje de la onda acústica. Los equipos utilizados para el UPVI son simples y portátiles. Esta inspección puede ser demorada para investigar un área grande, ya que este método es una técnica basada en puntos (Dilek 2007; Washer 2014).
- **IEI:** El estado de los puentes de RC puede evaluarse mediante el método IEI, donde se utiliza la onda de tensión generada por el impacto. La principal ventaja de este método es que solo necesita aplicarse a un lado de un miembro del puente de RC, y por lo tanto, esta inspección se puede aplicar a varios tipos de miembros de RC como cubiertas de RC, vigas cajón de concreto y estribos (Verma et al. 2013).
- **AEI:** Aunque el AEI se utiliza tradicionalmente para detectar las grietas en puentes de acero, recientemente se han desarrollado técnicas avanzadas para aplicar estos métodos de inspección para puentes de RC sometidos a corrosión (Washer 2014). En general, los datos del AEI para puentes de RC deben filtrarse utilizando algoritmos de procesamiento de datos apropiados, ya que los datos originales del AEI contienen ruidos inútiles (Grosse 2010).
- **RI:** El RI puede detectar daños en refuerzos y cables de pretensado, y vacíos en el concreto (Washer 2014). Cuando la radiación viaja a través de los miembros del puente de RC, las barras de refuerzo, el concreto, y los vacíos en el concreto absorberán diferentes cantidades de radiación. Usando la película radiográfica, la sensibilidad a la radiación se puede ilustrar, y finalmente los inspectores pueden detectar corrosión en refuerzos, vacíos, y grietas en el concreto (IAEA 2002).



5. Técnicas de Monitoreo de Salud Estructural



Los sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) miden continuamente los cambios en las características estructurales y comportamientos de los puentes en deterioro. Los cambios que superan un umbral predefinido se consideran como daño a través de algoritmos de detección de daños (Farrar y Worden 2007). Las características estructurales y comportamientos de los puentes pueden ser monitoreadas continuamente mediante la medición de vibraciones, deformaciones y desplazamientos locales y globales, entre otros (Doebling et al. 1998; Seo et al. 2016; Ostachowicz et al. 2019).

- **Basados en vibraciones.** Los sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (SHM) basados en vibraciones han sido comúnmente utilizados en puentes en deterioro en las últimas décadas (Peeters et al. 2001; Ostachowicz et al. 2019). Estos sistemas miden las características dinámicas como la frecuencia natural, la energía modal de deformación, la forma modal y la flexibilidad dinámica, entre otros (DeWolf et al. 2002; Seo et al. 2016). Las técnicas asociadas generalmente se basan en la premisa de que el daño producirá cambios en las características dinámicas de un miembro o sistema de puente. Entre las características dinámicas, las frecuencias naturales de los componentes y el sistema del puente se han utilizado para investigar el daño estructural global y local. Utilizando algoritmos probabilísticos y estadísticos, se puede identificar el daño con su ubicación y magnitud.

- **Basados en deformaciones.** Los sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (SHM) basados en deformaciones, que recopilan datos de deformación de condiciones de carga controladas y no controladas en el puente monitoreado, pueden utilizarse para identificar el daño por fatiga de puentes de acero (Kwon y Frangopol 2010, 2011). Las pruebas de carga controlada incluyen pruebas estáticas en parque, pruebas de arrastre asociadas con un camión de baja velocidad (por ejemplo, hasta 10 km/h) y pruebas dinámicas asociadas con un camión de alta velocidad (por ejemplo, hasta 80 km/h) (Connor y Santosuosso 2002; Connor y McCarthy 2006). Con los datos monitoreados de las condiciones de carga controlada, se pueden determinar las tensiones y deformaciones máximas, y se puede verificar las investigaciones analíticas basadas en modelos de elementos finitos de puentes. Esta información se puede utilizar para evaluar el rendimiento estructural de puentes en deterioro (Frangopol et al. 2008a, 2008b; Orcesi y Frangopol 2010).
- **Basados en visión.** Los sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (SHM) basados en visión permiten monitorear desplazamientos locales y globales, así como condiciones externas de puentes en servicio (Xu y Brownjohn 2018). Junto con los desarrollos en cámaras de alta resolución, sensores ópticos y técnicas de procesamiento de imágenes digitales, los sistemas de SHM basados en visión han sido investigados y aplicados para la gestión de puentes. Estos permiten una instalación fácil, monitoreo remoto, y mediciones multi-punto utilizando un sólo instrumento óptico para una estructura grande.
- **Basados en GPS.** El sistema de SHM basado en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es capaz de medir continuamente los desplazamientos globales de puentes existentes bajo todas las condiciones climáticas, donde se pueden evaluar simultáneamente el desplazamiento estático y las características dinámicas (Casciati y Fuggini 2009). Este sistema es adecuado para monitorear desplazamientos de estructuras con una frecuencia natural relativamente baja, como edificios altos, puentes de gran luz, presas a gran escala, torres y chimeneas. La precisión del sistema GPS puede mejorarse significativamente mediante la integración con otros tipos de sistemas de SHM, incluidos los basados en vibración, deformación y visión (Myung et al. 2014).



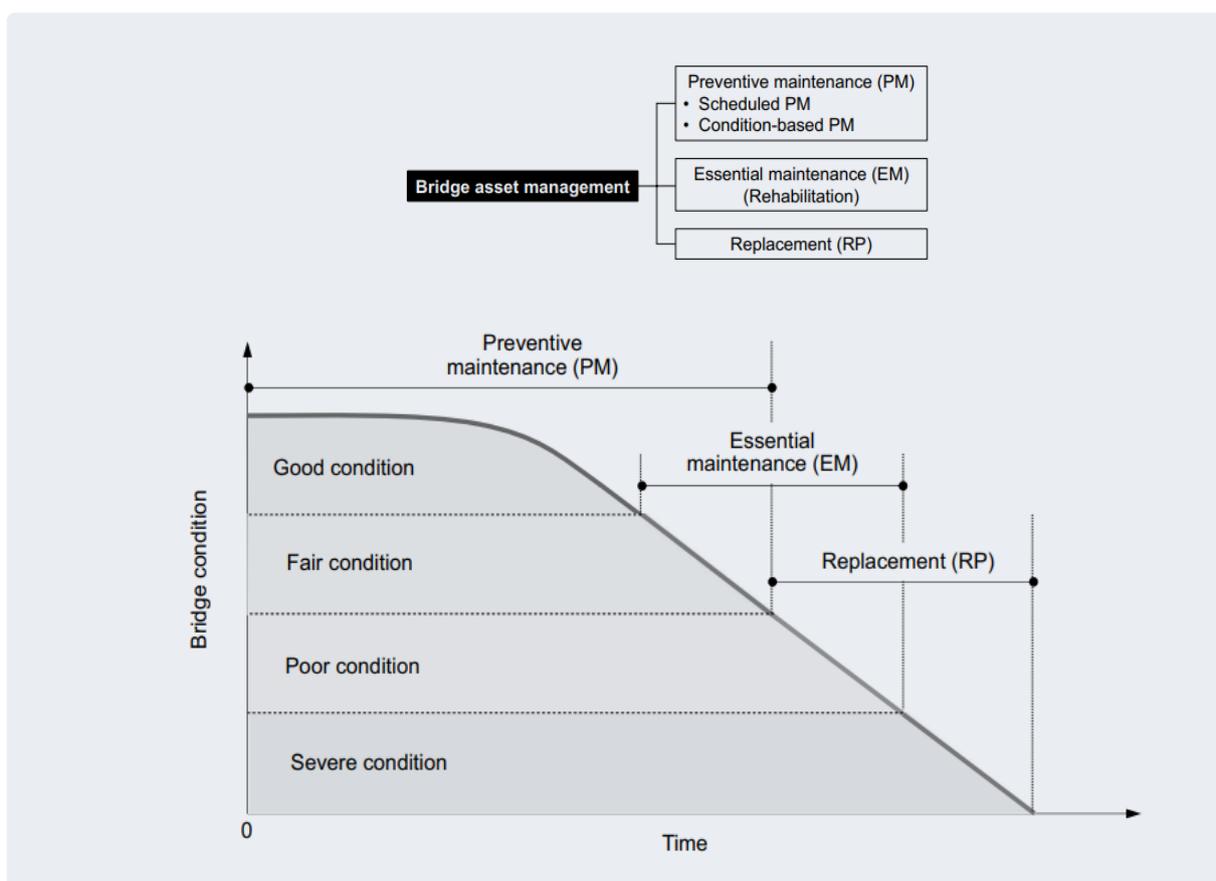
6. Mantenimiento de puentes y reemplazo



En general, la gestión de activos de puentes indica las acciones y estrategias relacionadas con la prevención de fallas estructurales inesperadas, la extensión de la vida útil, el retraso y la reducción del deterioro, y la mejora del rendimiento estructural y la condición (Frangopol et al. 2001; AASHTO 2007a; Alampalli 2014; FHWA 2018).

Como se muestra en la Figura 3, la gestión de activos de puentes se clasifica en PM, EM (o rehabilitación) y RP (FHWA 2018). También muestra las condiciones de los puentes dependientes del tiempo y los tipos apropiados de mantenimiento de puentes. Las cuatro condiciones (bueno, regular, malo y grave) están relacionadas con los valores de calificación de condición del Inventario Nacional de Puentes (NBI) de 0 a 9, implementado en los Estados Unidos. La condición buena está asociada con los valores de calificación de condición del NBI 7, 8 y 9. Los valores de calificación de condición del NBI 5 y 6 son equivalentes a la condición regular. La condición mala está representada por el valor de calificación de condición del NBI 4. La condición grave puede expresarse con los valores de calificación del NBI de 0 a 3 (FHWA 2018). Para condiciones de puente buenos y regulares, el PM se puede aplicar en un momento programado y/o condición predefinida para reducir el deterioro del rendimiento del puente. El EM se realiza cuando el rendimiento del puente alcanza una condición regular o mala. El reemplazo del puente aplicado en condiciones de puente malas o graves se refiere al reemplazo completo de un puente estructuralmente deficiente por un puente nuevo, lo que conduce a un rendimiento inicial del puente (Alampalli 2014; FHWA 2018).

Figura 3. Tipos de mantenimientos y condiciones de los puentes



- **Mantenimiento preventivo o rutinario.** El mantenimiento preventivo (PM, por sus siglas en inglés) se aplica a intervalos de tiempo predefinidos para mantener un puente en una condición buena o regular, retrasar el deterioro del rendimiento estructural y prevenir los enormes costos futuros causados por la rehabilitación o reemplazo de puentes (FHWA 2015).
- **Mantenimiento esencial.** El mantenimiento esencial (EM, por sus siglas en inglés) se realiza cuando el rendimiento del puente alcanza una condición regular o pobre y puede resultar en la restauración de la integridad del puente, el aumento del rendimiento del puente y la extensión de la vida útil. El EM incluye el reemplazo parcial o completo del tablero, la superestructura y los pilares (FHWA 2018).
- **Reemplazo.** El mantenimiento es el trabajo a nivel de componente del puente para mejorar la condición y el rendimiento del componente sin restaurar completamente el sistema de puente a su condición y rendimiento inicial (Alampalli 2014). Según FHWA (2018), RP se define como el reemplazo completo de un puente existente con uno nuevo construido en el mismo corredor de tráfico. Cuando la condición del puente es pobre o severa, y el mantenimiento no es rentable y no puede mejorar significativamente la condición del puente, se necesita aplicar el RP.



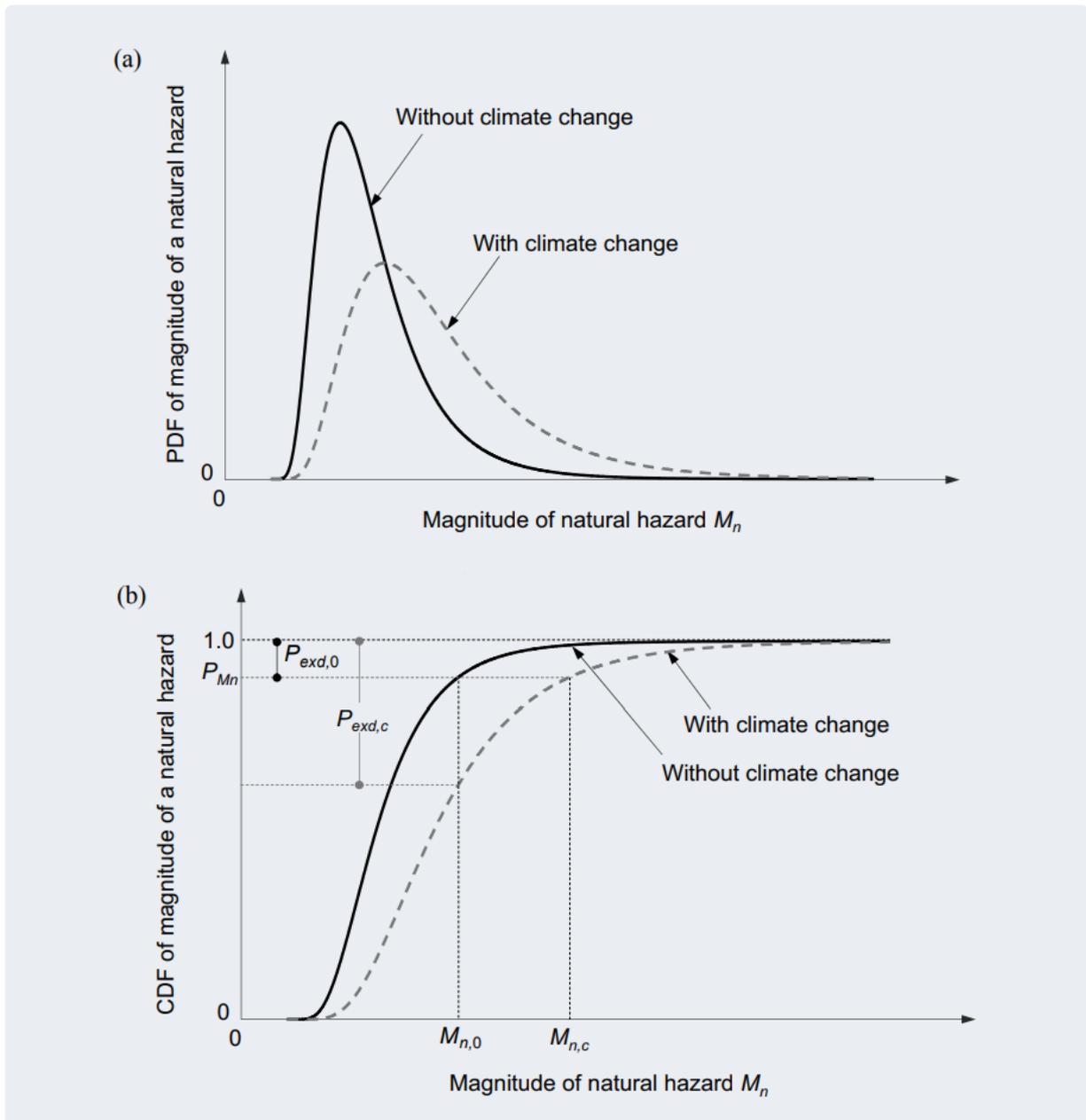
7. Mantenimiento de puentes y cambio climático



El cambio climático es una preocupación fundamental en la gestión de puentes, ya que puede ocasionar eventos climáticos más intensos y frecuentes, como inundaciones y huracanes. Además, los cambios en la concentración atmosférica de CO₂, la temperatura y la humedad pueden afectar negativamente el rendimiento de los puentes en un período de tiempo relativamente corto. (Bastidas-Arteaga et al. 2010, 2013; IPCC 2014; Wang et al. 2012; Stewart and Deng 2015)

El cambio climático se asocia con el aumento de la concentración atmosférica de CO₂, así como con un incremento en la frecuencia y magnitud de eventos naturales como terremotos, huracanes, inundaciones y tsunamis (Stewart et al., 2011; Stewart y Deng, 2015; Dong y Frangopol, 2016b).

Figura 4. Cambio Climático y magnitud de los eventos de riesgo



La figura 4 muestra el efecto del cambio climático sobre la media y la desviación estándar de la magnitud del riesgo. Se requiere un análisis racional de cómo el cambio climático afecta la magnitud y la probabilidad de los riesgos, y cómo estos cambios inciden en el rendimiento de los puentes, para gestionar de manera efectiva dicho rendimiento en un contexto de cambio climático (Mondoro et al. 2018a; Akiyama et al. 2020).

En este sentido, la influencia del cambio climático en el desempeño de los puentes se puede explicar en tres aspectos.

- **Corrosión.** La corrosión en estructuras de concreto reforzado está afectada por varios factores ambientales, incluyendo la temperatura, la humedad y la concentración de CO₂ en la atmósfera (Bastidas-Arteaga y Stewart 2015; Stewart et al. 2011, 2012).
- **Socavación por inundaciones.** El socavamiento inducido por inundaciones puede reducir significativamente el rendimiento de los puentes al exponer sus cimientos de pilares. Para el análisis del socavamiento inducido por inundaciones, se requiere una información extensa relacionada con la magnitud y la frecuencia de las inundaciones. Dada la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de las inundaciones, se puede estimar el rendimiento probabilístico de los puentes considerando tanto los modos de falla vertical como lateral de los cimientos de los pilares (Dong y Frangopol 2016b).
- **Huracanes.** Los puentes de un sólo tramo con poca altura libre son susceptibles a deslizamientos del tablero debido a fuerzas de elevación generadas por tormentas severas y huracanes (Mondoro et al. 2017). La fuerza vertical total de elevación se calcula como la suma de la fuerza cuasiestática máxima y la fuerza de impacto vertical asociada (AASHTO 2007b).

Adaptación de gestión de puentes frente al cambio climático

El efecto del cambio climático en el rendimiento de los puentes puede mitigarse mediante estrategias de adaptación apropiadas para la gestión de puentes (IPCC 2014; Stewart y Deng 2015). Estas estrategias de adaptación incluyen el fortalecimiento de los estándares de diseño de puentes, la utilización de nuevos materiales y la rehabilitación y fortalecimiento de puentes (Bastidas-Arteaga y Stewart 2015). La rehabilitación y fortalecimiento de puentes mejoran la resistencia contra deslizamientos del tablero, fallas de la subestructura, erosión costera, daños por viento y socavamiento, entre otros (Mondoro et al. 2018a).

Las fuerzas extremas de elevación y transversales inducidas por huracanes pueden dañar el tablero del puente (Ataei y Padgett 2013). Para reducir estas fuerzas en el tablero del puente y aumentar su resistencia, se pueden adoptar las siguientes medidas: (a) utilizar grandes potenciales de inundación por marejadas ciclónicas y altura de olas (Rosenzweig et al. 2011); (b) insertar agujeros en la superestructura de un puente para reducir la fuerza de flotación que actúa sobre la superestructura durante inundaciones y huracanes (Sawyer 2008); y (c) aplicar conexiones entre la superestructura y la subestructura del puente (por ejemplo, amarres, retenedores y barras de anclaje) para aumentar la resistencia contra movimientos ascendentes y transversales (Okeil y Cai 2008; Ataei y Padgett 2013).



Las capacidades de corte y flexión de una subestructura de puente pueden ser insuficientes para resistir cargas hidráulicas durante eventos hidráulicos extremos. Cuando la exposición continua a cloruros corroe las subestructuras de concreto reforzado del puente, las capacidades de corte y flexión del puente disminuyen drásticamente. Dependiendo del grado de daño, se pueden aplicar mantenimiento (por ejemplo, recubrimientos superficiales, envolturas de pilotes, chaquetas de pilotes con refuerzo) y reemplazo completo para restaurar las capacidades de corte y flexión (FHWA 2010; Mondoro et al. 2018a). El socavamiento en la subestructura del puente es causado por precipitaciones extremas, lo que reduce la capacidad y estabilidad de la subestructura del puente. Las contramedidas contra el socavamiento pueden prevenir daños en las subestructuras del puente (Mondoro et al. 2018a). Estas contramedidas incluyen control del canal de aproximación, control del canal aguas abajo, blindaje de la abertura del puente y control de drenaje (NCHRP 2007; Agrawal et al. 2007).

Los vientos extremos asociados con huracanes costeros severos pueden representar una amenaza significativa para la seguridad de los puentes de gran luz. Durante vientos extremos, la vibración excesiva que resulta en rangos de tensión altos en lugares críticos (por ejemplo, anclajes de cables) puede causar iniciación y propagación de grietas por fatiga (Li et al. 2002; Fujino y Siringoringo 2013; Zhang et al. 2014). La vibración inducida por el viento puede reducirse mediante la adopción de sistemas de control de vibraciones. La propagación de grietas por fatiga puede prevenirse aplicando las inspecciones y mantenimientos apropiados como se indica en las secciones 3.2 y 4.2. Una revisión detallada sobre métodos de adaptación para la gestión de puentes bajo el cambio climático se puede encontrar en Mondoro et al. (2018a).

