

Catálogo modular para la inspección integral de los elementos de puentes tipo losa y viga

Paola Arriaga Orejel¹, Luis Alberto Morales Rosales², José Eleazar Arreygue Rocha¹,
Alejandro Medina Santiago³

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo/ Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres

² CONAHCYT-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo/Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres

³ CONAHCYT-Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica/ Departamento de Ciencias Computacionales

Resumen

Una infraestructura vial adecuada es fundamental para el desarrollo socioeconómico del país. El mantener en buen estado los activos es un reto que enfrenta los diferentes niveles de gobierno, ya que debe contemplar el estado funcional, operativo y el nivel de seguridad que ofrecen. En México un activo poco evaluado por su complejidad es el puente carretero. Existen manuales que presentan criterios de inspección y evaluación de puentes, que, a pesar de mostrar criterios puntuales, sólo consideran algunos elementos de los componentes principales (tablero, superestructura y subestructura). Además, no establecen relaciones entre los elementos de cada componente para realizar la evaluación, ni es considerada la progresión de los deterioros que existen en los componentes ocasionados por la influencia que tiene la condición de los elementos que trabajan en conjunto. En este trabajo, presentamos un catálogo modular para la evaluación de todos los elementos de un puente de losa o de viga. Se contemplan las propiedades que cada elemento tiene, evaluando su deterioro de manera individual para determinar la condición de la estructura de manera modular y con ello establecer las relaciones de manera integral entre sus propiedades, elementos, factores, y componentes. Las relaciones permiten ejecutar una inspección integral con el fin de determinar las causas que incrementan el deterioro entre los diferentes elementos y componentes. Al conocer el estado integral del puente a partir de una evaluación modular será posible planificar y ejecutar el mantenimiento periódico, preventivo o correctivo necesario acorde a la progresión de los deterioros.

Abstract

Adequate road infrastructure is fundamental for any country's socioeconomic development. Keeping the assets in good condition is a challenge for the different governmental levels since they must contemplate functional and operative requirements along with safety. In México, road bridges are not often evaluated because of their complexity. There exist manuals that present punctual inspection and evaluation criteria for the bridges. Nevertheless, they only consider some elements of the principal components (deck, superstructure, and substructure). In addition, these manuals don't establish relations between the elements of each component for their evaluation. Neither is considered the progression of deterioration on the components caused by the influence of the condition of the elements that work together. This work presents a modular catalog to evaluate all the elements in a slab or girder bridge. We contemplate each element's properties, evaluating its deterioration individually to determine the structure's condition modularly to establish integral relations between their properties, elements, factors, and components. The relations allow executing an integral inspection to assess the causes that increase the deterioration between the different elements and components. Knowing the integral condition of the bridge by a modular evaluation, it will be possible to plan and execute the periodic, preventive, or corrective maintenance required according to the progression of the deterioration.

Palabras Clave: Puentes, elementos, evaluación, integral, preventivo

Keywords: Bridges, elements, evaluation, integral, preventive

1. INTRODUCCIÓN

Una infraestructura vial adecuada es fundamental para el desarrollo socioeconómico del país (SCT, 2018). La infraestructura carretera está compuesta por activos viales, entre los más importantes se encuentran: el

pavimento, las estructuras (puentes, túneles, drenaje y taludes), dispositivos (señalización, iluminación, casetas), entre otros (Gómez Aguilar J., 2020). Los activos deben ser evaluados para identificar su estado funcional, operativo y nivel de seguridad que ofrecen. Dentro de la parte de las estructuras, uno de los activos que en México es poco evaluado por su complejidad son los puentes carreteros. El objetivo de los puentes es unir dos puntos inaccesibles ya sea de manera horizontal o vertical y están diseñados para resistir las solicitaciones a los que estarán sometidos (Sánchez F., 2015).

En México, de acuerdo con la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) la operatividad de los puentes está relacionada con el estado funcional del camino. Los puentes son activos vulnerables en las carreteras y representan la inversión unitaria más alta de todos los elementos del sistema de caminos (SCT, 2018). Por su gran importancia, en México, se desarrolló el Programa Nacional de Conservación de Carreteras con el objetivo de mejorar el mantenimiento de las vías carreteras y sus activos (SICT, 2022). Sin embargo, no fue hasta el año 2013 que el gobierno mexicano comenzó a registrar una mayor inversión a las obras de mantenimiento de la red vial y no solamente a la construcción de nuevos activos (SCT, 2021).

Existen sistemas internacionales de gestión de puentes que utilizan los gobiernos internacionales, como el Sistema de Administración de Puentes (SIAP) en México (SCT, 1994) o PONTIS en Estados Unidos (Gutkowski, Richard M. et al., 1998). Estos sistemas se encargan de inspeccionar, clasificar y registrar la condición de los puentes para ejecutar acciones de mantenimiento que les devuelvan su funcionalidad. Los sistemas de gestión se auxilian de manuales de inspección que utilizan los profesionales inspectores para determinar el estado en el que se encuentran de manera individual los elementos de un puente para calificar de manera integral el estado del puente.

Existen manuales que presentan criterios de inspección y evaluación, tales como el manual AASHTO (AASHTO, 2010), Manual de inspecciones de estructuras de Ontario (Ministry of Transportation, 2008), la Guía para inspecciones de puentes de Perú (MTC, 2006), Manual para la inspección visual de estructuras viales (COTO, 2018) que presentan criterios de inspección y evaluación de los elementos de la estructura.

A pesar de mostrar criterios puntuales, estos manuales no consideran todos los elementos del puente, pues se enfocan solamente en los elementos principales (tablero, superestructura y subestructura) omitiendo la influencia que tienen los elementos secundarios sobre el desempeño del puente. Esto impide planificar y ejecutar el mantenimiento periódico, preventivo o correctivo necesario acorde a la progresión de los deterioros.

Estas deficiencias impiden que, al diagnosticar un puente, se atiendan todos los requerimientos para evitar su deterioro y que, a pesar de ejecutar acciones de conservación en los elementos prioritarios de manera periódica, los elementos secundarios del puente continúen deteriorándose. Esto produce que los costos de conservación se eleven, ya que, en lugar de ejecutarse una conservación preventiva para evitar avances en los deterioros, la cual permitiría devolverle al puente de forma integral su estado funcional, las acciones de conservación se ejecutan de forma correctiva con un deterioro cada vez mayor.

En este trabajo, presentamos la elaboración de un catálogo modular de todos los elementos de un puente de losa o de viga. Particularmente, el catálogo se enfoca en determinar las relaciones entre los elementos de la estructura de un puente para la ejecución de inspecciones integrales que permitan establecer las causas que incrementan la afectación en los diferentes elementos. Además, presenta las propiedades que cada elemento tiene evaluando su deterioro de manera individual para posteriormente determinar la condición de la

estructura de manera modular. La clasificación modular del catálogo permite establecer las condiciones funcionales y estructurales para determinar la influencia que tiene su condición sobre el estado integral de la estructura. Al conocer el estado integral de la estructura e individual de los elementos será posible ejecutar el mantenimiento periódico, preventivo o correctivo necesario en cada elemento del puente acorde al deterioro presentado.

2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección, se analizan distintos manuales de inspección de acuerdo a la normativa internacional. El análisis se enfoca en identificar los elementos del puente que considera cada manual, así como sus criterios de evaluación con el fin de destacar las fortalezas y deficiencias de cada uno.

Análisis de manuales de inspección internacionales: comparativa y deficiencias

La información que se utiliza al evaluar la condición de los elementos de un puente se recauda mediante una inspección visual ó detallada. Estas inspecciones se realizan bajo diferentes criterios que permiten al inspector calificar la condición de sus componentes y decidir qué tipo de mantenimiento se tendrá que ejecutar para mantener al puente en una condición deseada.

Los manuales analizados se clasificaron con respecto a la evaluación completa que se le asigna al activo. La evaluación del activo corresponde a dos tipos de calificación: global o individual. Una calificación global pretende incluir todos los deterioros encontrados en la estructura para asignar una sola calificación al puente. Por otra parte, una calificación individual indica la asignación de calificaciones a los elementos individuales de la estructura sin determinar una relación entre los deterioros encontrados para asignar una calificación general al puente.

Manuales con calificación global

El manual (Grupo técnico-convenio 587 de 2003,2006) fue elaborado junto con el Instituto Nacional de Vías de Colombia en el año 2006 convirtiéndose en una herramienta de suma importancia para la evaluación y mantenimiento de los puentes nacionales. El manual se enfoca en categorizar en cuatro conjuntos principales a los elementos de un puente: superficie y equipamiento, superestructura, subestructura y todo aquello que no está contemplado en estas tres categorías, forma parte del conjunto denominado “otros”. A partir de esta clasificación se describe cada elemento junto a sus materiales. Además, se mencionan los daños que cada elemento suele presentar sin ponderar una calificación acorde a su severidad.

Por otro lado, el manual mexicano (SCT, 2018), detalla los tipos de puentes, sus partes y los materiales con los que pueden estar contruidos. Explican cómo se desempeñan los elementos dentro de la estructura y el perfil que debe cumplir el inspector para levantar la información de campo requerida. Además, se describen los procesos de evaluación con el objetivo de recomendar el tipo de inspección necesaria para realizar la evaluación del puente, mostrando una metodología que permita ejecutar este proceso de evaluación. En este manual, se presentan criterios para calificar la condición de un puente aplicables a inspecciones y evaluaciones visuales. Las calificaciones se generan con base en el criterio del inspector procurando homogeneizarlos mediante un catálogo de daños. Los autores se fundamentan en un análisis integral con calificaciones globales

determinadas con base en los deterioros observados en cada elemento basándose en el tipo, la severidad y la extensión de los daños en cada uno de ellos.

Así mismo, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) desarrolló el Sistema de Administración de Puentes (SIAP) (Carrión F. et al., 2011) que ha servido de apoyo para evaluar el estado de estos activos viales y del cual el manual desarrollado por la SITC se apoya para asignar las calificaciones.

En la Tabla 1, se muestran los seis niveles de calificación empleados para el estado individual de cada elemento del puente propuestos por el Sistema de Administración de Puentes (SIAP), donde el nivel 5 representa una condición excelente, en cambio el nivel cero es una condición de falla.

Tabla 1. Descripción de niveles del Sistema de Administración de Puentes (SIAP)

Nivel	Descripción
5	Condición excelente
4	Condición buena
3	Condición aceptable
2	Condición regular
1	Condición mala o defectuosa
0	Condición de falla

Por cuestiones de practicidad, los autores (SCT, 2018) recomiendan que los elementos que ellos clasifican como principales del puente: superestructura, subestructura, superficie de rodamiento, cimentación (socavación), y demás elementos estructurales, se califiquen en alguno de los niveles que se muestran en la Tabla 1. Al término de la inspección, el jefe de la brigada procederá a dar una calificación del estado global del puente, con base en las calificaciones de la Tabla 1 para cada componente del puente, clasificándolo globalmente en uno de los tres grados que se muestra en la Tabla 2 con base a la descripción que se menciona en la misma.

Tabla 2. Grado de deficiencias con respecto al rango de calificaciones (SCT, 2018)

Grado de deficiencias	Descripción	Necesidad de atención
Grado "A"	Puentes o estructuras que presentan una o más deficiencias graves que impliquen un peligro inminente para la seguridad pública o que puedan ocasionar la interrupción prolongada del tránsito sobre el puente.	Requiere atención inmediata.
Grado "B"	Aquellos que presenten una o varias deficiencias importantes, que de no atenderse pueden evolucionar hacia deficiencias graves.	Requiere atención a mediano plazo (seis años).
Grado "C"	Los que solo presenten deficiencias menores con evolución lenta.	Mantenimiento rutinario.

El manual de Perú (MTC, 2006) describe el proceso de inspección y la frecuencia con la que se debe ejecutar. Además, describe los tipos de puentes que pueden existir, definiendo seis calificaciones para la condición global de la estructura, determinando su condición con base en el avance de los deterioros encontrados en los elementos que el manual considera como primarios o críticos. Las calificaciones se asignan con números del cero al cinco, siendo cero un estado muy bueno y cinco un estado pésimo. Sin embargo, los criterios de inspección no son puntuales y son escasos. El manual ofrece una descripción de los deterioros que se pueden encontrar junto al probable origen de estos. No obstante, no define rangos de aceptación o descripción de la progresión del deterioro.

Calificación individual

El manual de Ontario, Canadá (Ministry of transportation, 2008) describe el proceso de la inspección, así como los daños que se pueden presentar en los elementos principales de un puente dependiendo del material del que esté conformado. Existen criterios de evaluación de cada daño para calificarlos en cuatro niveles: ligero, medio, severo y muy severo. Al obtener la calificación individual de los deterioros observados, se realiza una clasificación del estado del elemento considerando su severidad, asignándole al elemento una etiqueta de: excelente, bueno, justo, pobre. La información recaudada por los inspectores es cualitativa. El material auxiliar que se presenta en este manual para la inspección es la determinación de algunas relaciones entre daños presentes en diferentes elementos, fotografías que ejemplifican los daños en campo e ilustraciones que definen la magnitud de daño que se puede presentar en cada nivel de evaluación. Los elementos del puente se analizan de forma individual, esto dificulta determinar relaciones entre elementos y daños presentes. El propósito es determinar qué acción de mantenimiento es necesario ejecutar para eliminar el origen del deterioro. Además, se hace recomendaciones de mantenimiento periódico, preventivo y correctivo para ciertos deterioros encontrados en diferentes elementos.

Del mismo modo, el manual de Costa Rica (MOPT, 2007) en colaboración con expertos japoneses, tiene como objetivo establecer criterios de inspección y evaluación de la condición de los puentes existentes. Los elementos se clasifican en cuatro categorías: accesorios, superestructura, subestructura y accesos de aproximación, mencionando el tipo de elemento junto a sus materiales. Además, se expone cómo se deben documentar los resultados de la inspección. Asigna dos tipos de calificaciones, una numérica y otra basada en rangos de acuerdo a los valores de las normas. En la parte numérica se establecen calificaciones del 1 al 5, siendo 1 el mejor estado y 5 el estado más deteriorado. Los autores intentaron disminuir el sesgo personal en la evaluación de los elementos del puente estableciendo criterios donde el objetivo que se persigue es homogeneizar las calificaciones de los inspectores. Lo que establecen los autores son rangos definidos de aceptación para evitar la consideración de criterios personales u opiniones.

El manual presenta algunas recomendaciones de medidas de seguridad que deben tomar los inspectores y los usuarios durante los trabajos de mantenimiento. No obstante, no presenta un catálogo de acciones de mantenimiento de ningún tipo.

Otro manual que presenta calificaciones individuales es el manual estadounidense (AASHTO, 2010). Tiene como objetivo presentar todas las partes que conforman a un puente para calificarlos de forma integral. Sin embargo, no presenta un criterio para ponderar una calificación al puente con base en los elementos inspeccionados. Los elementos que se presentan son los componentes principales del puente que aportan la seguridad y la condición de servicio necesarios para su correcto desempeño. Estos elementos se califican en cuatro condiciones y a cada condición le corresponde una calificación tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Calificaciones manejadas en el Manual AASHTO (2019)

Calificación	Condición
Bueno	Condición 1
Justo	Condición 2
Pobre	Condición 3
Severo	Condición 4

En la condición 1, se establece que el estado del elemento es el adecuado, solamente se requiere revisar su sistema de protección y monitorearlo. En la condición 2 aún no se compromete el desempeño del puente, sus acciones de mantenimiento son revisar su sistema de protección y reparar los elementos deteriorados. En la condición 3 se presentan deterioros moderados a severos siendo necesario ejecutar acciones como revisar su sistema de protección, reparar los elementos deteriorados y rehabilitar a los elementos que lo requieran. Por último, la condición 4 incluye a todos los defectos que están más allá de los límites, requiriendo una revisión estructural del puente, pues su estabilidad se ve comprometida en este punto; las acciones que se ejecutarán serán revisar su sistema de protección o reemplazar al puente. Dispone de un apartado para la documentación de los hallazgos de la inspección. Se hacen recomendaciones para los informes requeridos para la evaluación de la condición del puente.

El manual de Nueva Jersey, Estados Unidos (New Jersey Department of Transportation, 2014) presenta los elementos y calificaciones basados en el manual (AASHTO, 2010). Añade un conjunto de elementos obtenidos en la Agency Developed Elements (ADE) describiéndolos de manera detallada junto con los deterioros que se pueden presentar en el material a causa de factores ambientales. Se determinan algunas calificaciones para los deterioros funcionales, pero principalmente las calificaciones se basan en los deterioros del material. Para asignar una calificación se exponen criterios de inspección con algunas secciones de comentarios para aclarar puntos específicos. La calificación del elemento será otorgada por el daño más severo que se encuentre en él.

El manual de Sudáfrica (COTO, 2018) publicado por “The South African National Roads Agency SOC Limited” describe el proceso de inspección y el perfil que requieren los profesionales para ejecutar la inspección. Además, menciona que los elementos se inspeccionan de acuerdo al tipo del puente analizado, clasificando los defectos y señalando los más comunes en los elementos del puente. El sistema de evaluación que utiliza este manual se denomina por sus siglas en inglés “DER”, donde se analiza el grado del deterioro (D), la extensión del daño (E) y la Relevancia que tiene el daño (R). Esta clasificación se muestra en la Tabla 4. El sistema permite calificar el estado de los elementos de un puente con base a 5 calificaciones determinadas con números del cero al cuatro, siendo el cero un grado sin defectos visibles y cuatro un grado de estado severo. Además, se determina la extensión del daño encontrado en los elementos junto con su relevancia mediante el factor “R”, el cual es el más difícil de evaluar, pues requiere inspectores muy capacitados para ejecutar esa tarea. Existen dos excepciones de calificación: un “X” determinando que no se puede ponderar un grado de daño al elemento y un “U” que establece que no es posible inspeccionar al elemento.

Tabla 4. Calificaciones DER (COTO, 2018)

Calificación	D (Grado)	E (Extensión)	R (Relevancia)	
X	No aplica			
U	No es posible inspeccionarlo			
0	No tiene defectos visibles			
1	Menor	Local	Mínimo	No existen problemas estructurales o de seguridad
2	Moderado	Más que local	Moderado	Algunos problemas posibles en la integridad estructural o en la seguridad
3	Alerta	Menos que general	Mayor	Integridad estructural o seguridad comprometidos
4	Severo	General	Crítico	Impacto potencialmente serio en la integridad estructural y/o seguridad del usuario

Para ponderar la calificación se requiere elegir cuál es el defecto más grave de entre los calificados, después se le otorga valores con respecto a su grado, extensión y relevancia, convirtiendo estos valores en la calificación única del elemento evaluado. A los defectos restantes también se les califica con la intención de dar un seguimiento a su estado y ejecutar acciones de mantenimiento al elemento si así lo requiere. Para priorizar las acciones de mantenimiento a los puentes que se encuentran en un estado más deteriorado que otros se determina un nivel de urgencia.

Se determinan relaciones entre los defectos de los elementos indicando cómo estos afectan al desempeño del puente. Sin embargo, no contempla las condiciones externas del puente, las cuales afectan en la aparición de deterioros prematuros sobre los elementos de este.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta la metodología desarrollada para realizar la comparativa entre los manuales analizados en el estado del arte y la elaboración del catálogo modular de elementos del puente con base en sus propiedades. La metodología está compuesta de 5 etapas: 1) la selección de manuales de inspección y evaluación de puentes, 2) la selección de manuales de construcción y diseño de puentes 3) un análisis

comparativo de los elementos con sus propiedades contenidos en los manuales de inspección y evaluación 4) la clasificación de deterioros con base a los materiales de los elementos, la generación de relaciones entre los elementos del puente, 5) la clasificación modular de los elementos de un puente con sus propiedades.

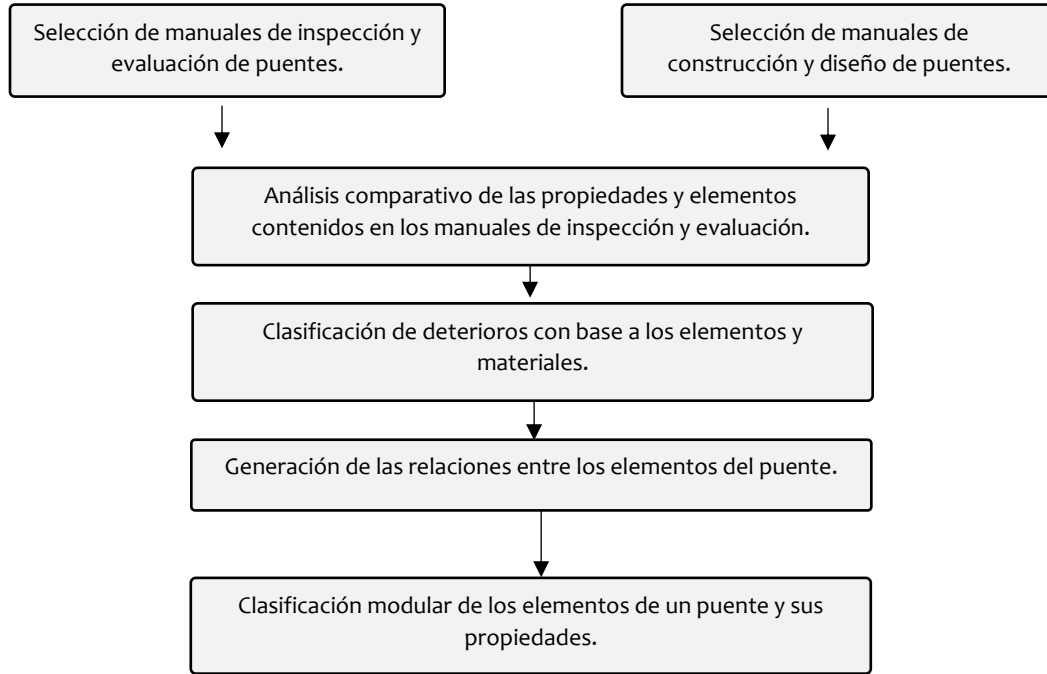


Figura 1. Metodología para el desarrollo del catálogo modular de evaluación de puentes de losa y viga

Uno de los primeros procesos de la metodología está orientado a identificar las deficiencias que existen en los manuales internacionales de inspección y evaluación complementándolas con el análisis de manuales de construcción y diseño de puentes, limitando la investigación a los puentes de tipo losa y viga, con el fin de conocer todos los elementos que pueden existir en los puentes, sus materiales y la importancia que tienen en el desempeño de la estructura. Posteriormente, nos enfocamos a realizar una clasificación modular de los elementos conforme a su función, ubicación, acompañado de las propiedades con las que cada elemento cuenta. Estas propiedades fueron definidas con base a los deterioros que se presentan en los diferentes tipos de material de construcción de los elementos.

Al conocer la importancia de cada elemento dentro del desempeño de la estructura, podemos categorizarlos en dos factores de importancia: estructural o funcional. Un elemento que representa un factor estructural en el desempeño del puente requiere mayor atención que un elemento que representa un factor funcional, pues los elementos estructurales son los que resisten las cargas aplicadas en la estructura. La determinación de los factores estructural y funcional facilita la generación de relaciones entre los elementos, determinando influencias y logrando clasificarlos de manera modular con respecto a su importancia con el fin de facilitar al encargado evaluador el trabajo de calificar la condición integral de la estructura.

A continuación, presentamos a detalle cada uno de los elementos de la metodología descritos en la Figura 1.

Selección de manuales de inspección y evaluación de puentes

La selección de los manuales consistió en identificar aquellos que evaluaran puentes de losa y viga principalmente, describieran los elementos de los puentes, mostraran criterios de inspección y evaluación junto con propuestas de acciones de mantenimiento. Además, se dio prioridad a la identificación de aquellos que tuvieran un impacto importante internacionalmente con base en el avance que tiene la infraestructura de los países a los que pertenecen.

Selección de manuales de construcción y diseño de puentes

Para complementar la información obtenida en los manuales de inspección y evaluación de puentes e identificar las deficiencias que pueden presentar en la selección de los elementos evaluados, se analizaron manuales de diseño y de construcción. El objetivo principal fue conocer todos los tipos de elementos que pueden existir en los puentes, conociendo cuál es su función dentro de la estructura para definir su importancia, determinar su grado de deterioro permitido por la normativa y clasificarlos acorde a las relaciones que presentan con otros elementos.

Análisis comparativo de las propiedades y elementos contenidos en los manuales de inspección y evaluación

Se realizó un análisis comparativo de los manuales seleccionados, evaluando los elementos referentes a los puentes de losa y viga específicamente. Particularmente, se determinó si califican la condición de los elementos con base en los criterios de inspección y evaluación, cuáles presentan acciones de mantenimiento y lo más importante si determinan relaciones entre los deterioros de los elementos del puente para evaluarlo de manera integral. A partir de ese análisis comparativo y la revisión de manuales de diseño, se realizó la clasificación de los elementos por conjuntos conforme a su función y ubicación.

Clasificación de deterioros con base a los elementos y materiales

En esta etapa se realizó una investigación en los manuales de diseño sobre los tipos de materiales utilizados para construir los elementos de los puentes de losa y viga con el fin de determinar el tipo de deterioro que pueden aparecer en estos. Al realizar la relación entre los materiales y los deterioros, se lograron determinar las propiedades principales que cada elemento del puente puede tener. Estas propiedades se agregaron modularmente a la clasificación de los elementos obtenida en el paso anterior.

Generación de las relaciones entre los elementos del puente

A partir de la clasificación en conjuntos las propiedades que presenta cada elemento, se establecen los factores de importancia que cada elemento representa en el puente. Estos factores componen el estado de cada uno de los componentes del puente. Los factores se clasifican en funcionales y estructurales. Los funcionales son aquellos que no desempeñan un trabajo de resistencia en la estructura y su deterioro no representa un riesgo inminente de colapso de la estructura. En cambio, los estructurales son aquellos elementos que resisten las cargas aplicadas en el puente y que si se encuentran en un mal estado requieren de una atención inmediata para no comprometer la seguridad de la estructura o de los usuarios. Con base en estos dos factores identificados, se realizan las relaciones entre elementos del puente conforme a su ubicación, desempeño e importancia.

Estas relaciones se realizan con base en una jerarquización que se modulará de la siguiente manera:

- El nivel más bajo incluirá las propiedades que definen a cada elemento individual del puente. Estas propiedades son las que presentan las patologías de los deterioros de cada elemento, con base en estas será posible determinar la condición en la que se encuentran los elementos individuales del puente.
- En el segundo nivel se encontrarán los elementos individuales a las que se les podrá asignar una calificación con base a las patologías encontradas en sus propiedades.
- El tercer nivel estará definido por los factores de importancia que representa cada elemento individual dentro de su componente: funcional o estructural. Estos factores son importantes para determinar la importancia de cada componente en el desempeño del puente.
- En el cuarto nivel se encontrarán los componentes del puente. Estos módulos se dividirán en cinco clasificaciones: drenaje, tablero, superestructura, subestructura y condiciones.
- En el quinto nivel se encuentra el puente. La condición integral de este se podrá definir con base en el estado en el que se encuentra cada uno de sus componentes.

Catálogo modular de los elementos de un puente y sus propiedades

El catálogo modular se desarrolla tomando en cuenta los cinco niveles de clasificación de la etapa anterior para ejecutar de manera integral una evaluación de la estructura. El primer nivel es el de las propiedades, en este se determinan los deterioros encontrados en las inspecciones de campo junto con la severidad que tiene cada uno. En el segundo nivel se encuentran los elementos individuales del puente, a los cuales será posible asignarles una calificación individual con base a los deterioros encontrados en sus propiedades. El tercer nivel es el factor de importancia de cada elemento, este factor determina la influencia que tiene el deterioro de cada elemento sobre el desempeño del puente. En el cuarto nivel se encuentran los componentes, esta clasificación se realiza para modular los elementos individuales del puente, facilitando la evaluación de los deterioros encontrados en campo con base al factor de importancia que cada elemento representa. El quinto nivel contiene al puente. En este último, la evaluación de los elementos del puente es integral, asignando una calificación de la condición de la estructura, permitiendo identificar qué tipo de mantenimiento es necesario ejecutar en cada elemento y con qué periodicidad.

4. RESULTADOS

Se analizaron 8 manuales internacionales de inspección y evaluación con base a 9 elementos analizados y su comparativa se muestra en la Tabla 5a y 5b.

Internacionalmente existen diferentes tipos de puentes, es por eso que es necesario identificar la cobertura que tiene cada manual sobre los tipos de puentes para ejecutar sus inspecciones. En el caso de México, los tipos de puente más utilizados y analizados son de tipo losa y de viga.

Los manuales se encargan de inspeccionar y evaluar la condición en la que se encuentra un puente con diferentes enfoques, en esta comparativa se presentan dos: enfoque correctivo y enfoque preventivo. La determinación de los enfoques se da con base en las calificaciones y los criterios de evaluación que cada manual determina. Un enfoque preventivo tiene como objetivo identificar el deterioro progresivo de los elementos de un puente a través del tiempo. En cambio, el enfoque correctivo permite la aparición de deterioros más severos.

Tabla 5a. Comparativa entre manuales internacionales.

Manual	Ontario Structure Inspection Manual (Ministry of transportation, 2000)	Manual para inspección visual de puentes y pontones (Grupo técnico- convenio 587 de 2003, 2006)	Manual de inspección de puentes (MOPT, 2007)	Manual para inspección de puentes 2018 (SCT, 2018)	Guía para inspección de puentes (MTC, 2006)
País	Canadá	Colombia	Costa Rica	México	Perú
Tipo de puentes considerados	No especifica	Losa, viga, arco, colgantes, armadura.	Losa, viga, arco, colgantes, atirantados, armadura y “otros”.	Losa, viga, arco, colgantes, atirantados, armadura y “otros”.	Losa, viga, pórtico, arco, colgante, atirantado, modular, reticulado, alcantarilla.
Componentes	Tablero, superestructura, subestructura, río y protecciones.	Superficie y equipamientos, subestructura, superestructura en concreto, superestructura metálica, otros.	Accesorios, superestructura, subestructura y río.	Superficie sobre la estructura y accesos, superestructura, subestructura, cimentación y servicio bajo la estructura.	Cimentaciones, superestructura y dispositivos básicos de protección.
Deterioros evaluados	De materiales.	De materiales.	De materiales	De materiales y funcionales	De materiales y funcionales
Agrupación de elementos	Por componentes.	Por componentes.	Por componentes.	Por componentes.	Por componentes.
Relación entre elementos	No	No	No	No	Sí, al calificar globalmente al puente.
Calificaciones	Cuatro condiciones	Tres niveles descriptivos	Cinco grados de daño	Seis condiciones	Seis calificaciones sólo para el estado global.
Tipo de calificación del puente	Individual	Global	Individual	Global	Global
Enfoque	Correctivo	Correctivo.	Correctivo	Correctivo	Correctivo

Tabla 5b. Comparativa entre manuales internacionales.

Manual	Bridge element inspection manual (New Jersey Department of Transportation, 2014)	AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual (AASHTO, 2010)	Manual for the Visual Assessment of Road Structures (COTO, 2018)	Propuesta de modelo difuso de evaluación integral.
País	Estados Unidos	Estados Unidos	Sudáfrica	México
Tipo de puentes considerados	No especifica	No especifica	Losa, viga, arco.	Losa y de viga.
Componentes	Tablero, superestructura, subestructura, geotécnia, río y protecciones.	Tablero, superestructura, subestructura, factores medio ambientales.	Tablero, Superestructura, subestructura, alcantarillas, y otros.	Drenaje, tablero, superestructura, subestructura y condiciones.
Deterioros evaluados	De materiales, funcionales y medio ambientales.	De materiales, funcionales y medio ambientales.	De materiales, funcionales y medio ambientales.	De materiales, funcionales y condiciones.
Agrupación de elementos	Por componentes.	Por componentes.	Individual	Modular
Relación entre elementos	Sí, califica algunos defectos con respect a otros.	No	No	Sí
Calificaciones	Cuatro condiciones	Cuatro condiciones	Cinco calificaciones dentro de tres categorías DER.	Cuatro condiciones para las propiedades, tres condiciones para los elementos.
Tipo de calificación del puente	Individual	Individual	Individual con ponderaciones	Integral
Enfoque	Correctivo	Correctivo	Correctivo	Preventivo

Los elementos del puente generalmente se clasifican en componentes según su ubicación o su función. Esto facilita la ubicación de los elementos en el proceso de inspección. En los manuales, con base a la ubicación de los elementos y el desempeño que tienen dentro del puente, los elementos pueden clasificarse por conjuntos para facilitar la ejecución de las inspecciones, así como la determinación de calificaciones en el momento de ejecutar la evaluación de la condición de los componentes. Estos elementos presentan deterioros que a nivel general se pueden clasificar en tres tipos: de materiales, funcionales, medio ambientales y de condiciones., y se califican con respecto a su severidad asignándoles un nivel de importancia que representa en el desempeño del puente.

Con base a las calificaciones asignadas a la condición de los elementos individuales se determina una calificación general del puente y se suele dar de dos maneras:

- Global, tomando la condición de algunos factores y elementos principales del puente. Con base a estos se da una calificación a la estructura.
- Integral, en la cual se establecen niveles de importancia entre los elementos de un puente ponderando los deterioros encontrados en cada uno.

La determinación de las condiciones correspondientes contribuye a la toma de decisiones para seleccionar el tipo de mantenimiento a ejecutar. Sin embargo, en algunas ocasiones también ayudan a determinar la periodicidad en que un mantenimiento debe aplicarse, con el fin de acortar o alargar los tiempos entre mantenimientos. Este ajuste en la periodicidad se debe a las condiciones externas a las que algunos elementos del puente se someten y pueden dañarse prematuramente.

5. DISCUSIÓN

La selección de los manuales de inspección y evaluación analizados fue con base a sus alcances principalmente en los puentes de losa y viga para acotar la investigación. En este caso, todos los manuales cumplieron con este requisito, pues estos dos tipos de puentes son los más comunes y sencillos de analizar. Sin embargo, los manuales que más alcance tienen respecto a los tipos de puentes considerados son el (MTC, 2006), (SCT, 2018) y (MOPT, 2007). Estos dos últimos manuales consideran una sección para diferentes tipos de puentes (no especificados) llamada “otros”, dándonos a entender que los puentes que no están descritos en el manual pueden analizarse bajo esta clasificación. Por otro lado, hay manuales como (AASHTO, 2010), (New Jersey Department of Transportation, 2014) y (Ministry of transportation, 2000) que no especifican qué tipo de puentes se pueden analizar con los criterios definidos en el manual.

Los componentes en los que los manuales clasificaron a los elementos de los puentes varían dependiendo del manual y de la manera en la que esta clasificación se realizó. En general, los manuales describen tres componentes en común: superestructura, subestructura y elementos debajo del puente. En nuestro catálogo propuesto consideramos cinco componentes principales (drenaje, tablero, superestructura, subestructura y condiciones) en donde se clasificaron todos los elementos del puente según su ubicación, desempeño e importancia.

Con base a los elementos individuales de cada componente se determinan los deterioros que se evalúan, a nivel general se pueden clasificar en tres tipos: de materiales, funcionales, medio ambientales y de condiciones. Todos los manuales comparten el análisis de los deterioros sobre los materiales, ya que cada material se conforma de diferente manera a la intemperie y algunos se deterioran con mayor rapidez que otros. Evaluar los deterioros con base en su material es de gran importancia, sin embargo, algunos manuales como (SCT, 2018), (MTC, 2006), (New Jersey Department of Transportation, 2014), (AASHTO, 2010), (COTO, 2018) y en la presente propuesta, se encargan de analizar los factores externos que ocasionan un mayor progreso en el deterioro de los materiales de cada elemento. Esto toma gran importancia al momento de determinar la periodicidad en la que se deben ejecutar las acciones de mantenimiento en la estructura. Sin embargo, no existe una homogeneización en la forma en la que los distintos manuales asignan calificaciones, ya que al calificar un puente, aún siendo la misma persona quien lo evalúe, para cada manual el resultado puede ser distinto.

En nuestro catálogo, con base en lo que representa la severidad de los deterioros en el funcionamiento de la estructura, fue posible los niveles de importancia de cada elemento sobre el desempeño del puente. Los elementos individuales los clasificamos por niveles, comenzando con los componentes del puente, seguido del factor que representan los elementos de estos componentes dentro de la estructura: los funcionales son

aquellos que no desempeñan un trabajo de resistencia en la estructura y si la estructura no cuenta con estos elementos en un buen estado no representan un riesgo inminente de colapso. En cambio, los estructurales son aquellos elementos que sí resisten las cargas aplicadas dentro del puente, y si estos se encuentran en un mal estado requerirán de una atención inmediata para no comprometer la seguridad de la estructura o de los usuarios. Además, se determinan las propiedades que conforman a cada elemento con el objetivo de determinar las relaciones que existen entre los elementos del puente.

Los manuales clasifican por conjuntos a sus elementos al momento de mostrar los criterios de inspección y evaluación de cada elemento. Sin embargo, el manual (COTO, 2018) no realiza una clasificación de estos elementos. En cambio, en nuestra propuesta presentamos una tabla de clasificación modular de elementos que permite asignar niveles de importancia a cada elemento y deterioro inspeccionado, haciendo posible determinar relaciones entre los elementos de la estructura. En cambio, solamente en el manual (MTC, 2006) y (New Jersey Department of Transportation, 2014) determinan relaciones entre elementos (limitados) para calificar de manera global a la estructura. Los demás manuales, no tienen determinadas las relaciones que existen entre los elementos, impidiendo determinar la importancia de cada daño encontrado sobre la calificación global de la estructura.

Las calificaciones individuales que se otorgan en los manuales varían dependiendo de los criterios presentados, generalmente los manuales presentan cuatro o más calificaciones para cada deterioro. Sin embargo, el manual (MOPT, 2007) no exhibe calificaciones para todos los elementos del puente que se mencionan. Además, los criterios de inspección expuestos permiten un alto error humano, pues las descripciones son ambiguas. Esta misma situación ocurre en el manual (SCT, 2018), los criterios de inspección que se presentan son ambiguos y muy generales, permitiendo un alto error humano al momento de la evaluación de la condición de los elementos.

Existen deficiencias en el momento de asignar una calificación a la condición de la estructura. Los manuales (Ministry of transportation, 2000), (MOPT, 2007), (New Jersey Department of Transportation, 2014), (AASHTO, 2010) y (COTO, 2018) solamente presentan calificaciones sobre los elementos individuales, y los manuales (Grupo técnico- convenio 587 de 2003, 2006), (SCT, 2018) y (MTC, 2006) presentan calificaciones globales de la condición de la estructura, sin determinar la importancia de cada deterioro presente en la estructura. En el mismo contexto, en nuestra propuesta contemplamos cuatro niveles de severidad para las propiedades de cada elemento, además de presentar tres calificaciones para los elementos evaluados permitiendo determinar el daño que se encuentra en cada componente y la importancia que tiene sobre el funcionamiento de la estructura de manera integral. Esto último con la finalidad de permitir asignar una periodicidad en las inspecciones o acciones de mantenimiento, así como la determinación de los trabajos de mantenimiento desde un punto de vista preventivo.

Resaltamos que nuestra propuesta es el único trabajo que presenta un enfoque preventivo, con el objetivo de permitir identificar la condición en la que se encuentra un elemento y la progresión de su deterioro, para reducir costos de mantenimiento y elongar la vida útil del puente sin que sus elementos lleguen a un estado de deterioro avanzado. En cambio, los demás manuales analizados presentan un enfoque correctivo, donde se prioriza la evaluación acorde a la aparición de deterioros en etapas avanzadas.

Catálogo modular de los elementos y propiedades de un puente

La principal deficiencia que presentaron los manuales de inspección y evaluación es la falta de la generación de relaciones entre los elementos de un puente. Sin estas relaciones no es posible llevar a cabo una evaluación

integral del puente identificando los elementos dañados que influirán a un daño prematuro de los elementos contiguos.

Es por esta razón que en nuestro catálogo determinamos relaciones entre los elementos clasificándolo en módulos para facilitar la generación de estas relaciones. Los módulos fueron divididos en 5 componentes: drenaje, tablero, superestructura, subestructura, y condiciones. Estos componentes clasifican a los elementos que los componen dependiendo del factor que representan dentro de la estructura, acompañándose de las propiedades que se deben evaluar para identificar la condición del elemento para evaluar de forma integral al componente y al puente.

A continuación, se describe cómo se elaboró la clasificación de los elementos dentro de cada componente y la determinación de las relaciones entre estos.

Drenaje

En los manuales internacionales, el drenaje no se toma como un componente de alto impacto ni consideran a los elementos que lo componen, solamente se hace mención de algunas propiedades generales que se evalúan para conocer el estado general del sistema de drenaje. En nuestro caso, la Tabla 6 explica cuáles son las propiedades que debemos satisfacer para cada uno de los elementos considerados para la evaluación del drenaje.

Tabla 6. Componente del drenaje

Propiedades	Elementos		Factor	Componente
Pérdida de sección	Drenes de piso o tubo y bajadas	Obras de drenaje principales	Funcional	Drenaje
Especificaciones de diseño				
Contaminación				
Conexión				
Pérdida de sección	Drenes para muros de contención			
Contaminación				
Especificaciones de diseño				
Pérdida de sección	Obras de drenaje complementarias			
Factores externos				
Especificaciones de diseño				

En este catálogo modular se considera de gran importancia el drenaje de un puente ya que el buen funcionamiento de este, evita que aumente la posibilidad del deterioro prematuro del resto de los componentes del puente con los cuales se conecta el drenaje. Todos los elementos comprendidos en esta clasificación son funcionales. Esto quiere decir que si no se encuentran desempeñándose como es esperado, no habrá un riesgo de colapso de la estructura, sin embargo, no se debe omitir su evaluación y mantenimiento para que el puente funcione de acuerdo a los límites establecidos en su diseño.

Se identificaron los elementos más utilizados en el drenaje de un puente para dividirlos en dos grandes grupos: obras de drenaje principales y obras de drenaje complementarias.

Las obras de drenaje principales contienen dos elementos: 1) drenes de piso o tubo con sus bajadas y 2) drenes para muro de contención. En la zona del tablero se encuentran los drenes de piso o tubo con sus bajadas. Este

elemento se encarga de expulsar el agua que se acumula en las lluvias guiada a estos por el bombeo de la superficie de rodadura y por la guarnición. Pueden tener dos tipos de bajada, la primera es una pequeña sección de tubería que evita que el agua que baja por el dren se adhiera a los elementos de la superestructura o la segunda que son conexiones de tubería que bajan a través de la subestructura hasta una obra de captación debajo del puente. Por otro lado, los drenes para muro de contención son aquellos que se encuentran empotrados en los muros de los estribos de un puente. Su finalidad es abatir el nivel de aguas freáticas que contiene el material de relleno en el talud de entrada del puente y evitar daños por humedad.

En el conjunto de las obras de drenaje complementarias se encuentran aquellos elementos que captan el agua que es expulsada por las obras de drenaje principal o por las guarniciones del puente, como lo son los lavaderos, cunetas de captación debajo del puente y cualquier elemento que influya en la captación o dirección del agua acumulada en la estructura. Este tipo de obras toma una menor importancia dentro de la evaluación del componente del drenaje ya que un estado deteriorado de estos elementos no influye directamente al desempeño de la estructura.

Tablero

Este componente contiene todos los elementos de la superficie de uso, así como las losas que componen al puente. La mayor parte de los elementos son funcionales ya que nos encontramos en una zona superficial de la estructura y no se requiere que estos resistan cargas de la estructura por estar en la superficie. Sin embargo, existen elementos estructurales que están resistiendo la carga de los vehículos y de los elementos funcionales que se consideran en el componente. La Tabla 7 explica cuáles son las propiedades de los elementos considerados para la evaluación del tablero.

Tabla 7. Componente del Tablero

Propiedades	Elementos	Factor	Componente
Pérdida de sección	Losa	Estructural	Tablero
Contaminación			
Refuerzo			
Factores externos			
Conexión			
Placa rigidizante			
Deterioro	Losa de aproximación	Estructural	
Pendiente			
Asentamiento			
Deformaciones	Superficie de rodadura	Funcional	
Especificaciones de diseño			
Contaminación			
Factores externos			
Pérdida de sección			
Especificaciones de diseño	Junta de expansión	Funcional	
Daño			
Anclaje			
Superficie			

Especificaciones de diseño	Iluminado público	Funcional	Tablero	
Recubrimiento				
Daño				
Anclaje				
Dispositivos y pintura	Horizontal			Señalamiento
Especificaciones de diseño	Vertical			
Estado				
Contaminación				
Daño	Servicios públicos			
Efectividad	Barreras de contención			
Daño	Accesos peatonales			
Especificaciones de diseño	Banquetas, guarnición y camellones			
Conexiones	Barandal			
Pérdida de sección				
Factores externos				
Acceso				
Contaminación				
Especificaciones de diseño				
Conexiones				
Pérdida de sección				
Contaminación				
Factores externos				
Especificaciones de diseño				
Conexiones				
Pérdida de sección				
Conexiones				
Factores externos				
Especificaciones de diseño				
Contaminación				
Recubrimiento				
Cables				

Los elementos estructurales considerados son la losa y la losa de aproximación. Estos dos elementos resisten las cargas aplicadas sobre la superficie de uso transfiriéndolas a los elementos estructurales subyacentes. La losa es un elemento en su mayoría visible para la inspección de sus deterioros, se encuentra soportada transversalmente por los apoyos, sin embargo, esta debe ser suficientemente resistente para soportar las cargas de manera longitudinal para evitar el colapso del tablero. Por otro lado, la losa de aproximación es un elemento difícil de inspeccionar visualmente, pues se encuentra cubierta por otros elementos que se encuentran en la aproximación. La losa de aproximación generalmente tiene un apoyo directo sobre el terreno natural haciendo que la aparición de deterioros por las cargas aplicadas sea menos prematuro. Sin embargo, cuando existe asentamiento en el terreno natural se ve reflejado en la losa de aproximación ocasionando un fracturamiento o cambio de elevación entre este elemento y la losa del puente. Esto, en situaciones avanzadas, puede comprometer a la seguridad del usuario.

Por otro lado, uno de los elementos funcionales más importantes de evaluar en el tablero es la superficie de rodadura. Esta es un elemento funcional ya que no aporta resistencia a la estructura. Sin embargo, este elemento es uno de los más importantes en la infraestructura carretera pues es la encargada de dar confort y seguridad a los usuarios. Otro elemento funcional del tablero son las juntas de expansión, las cuales están ubicadas en las transiciones entre losas con el fin de permitir el movimiento individual de cada una sin dañar a los elementos consecuentes. Hay muchos tipos de juntas, pero se clasifican generalmente en: 1) abiertas, que son aquellas que tienen un hueco pero que están selladas superficialmente para evitar que entre contaminación o hallan filtraciones y 2) cerradas, aquellas que generalmente tienen un neopreno que rellena el hueco entre las dos losas para evitar problemas de drenaje o movimiento.

Los elementos de iluminación, señalamiento, servicios públicos y barreras son los principales encargados de brindar un viaje cómodo y seguro a los usuarios. La iluminación a pesar de no ser un elemento estructural juega un papel importante en la seguridad de los usuarios y en el cuidado de los elementos del puente para evitar daños por impacto causados por accidentes viales. Por otro lado, un buen estado del elemento de señalamiento significa una buena funcionalidad en el tránsito de los vehículos sobre la estructura. El elemento se divide en dos clasificaciones: 1) señalamiento horizontal y 2) señalamiento vertical. Los servicios públicos sobre el puente son elementos que no se usan con mucha frecuencia, sin embargo, su correcto funcionamiento es de suma importancia para brindar seguridad y confort a los usuarios cuando lo necesiten. Para finalizar, las barreras de contención representan un elemento de seguridad para los usuarios evitando principalmente el daño por impacto del flujo vehicular.

En el puente transitan usuarios en vehículos y a pie. Para garantizar la seguridad del peatón al hacer uso de la estructura existen elementos como los accesos peatonales, ya sean en rampa o escalera. También las banquetas, camellones y guarniciones, clasificándolos en el mismo conjunto ya que se conforman de la misma manera. Las guarniciones siempre acompañan a las banquetas, por ende, se comportan como un elemento de ellas. Así mismo, los camellones generalmente tienen una plataforma que se comporta igual que una banqueta. Es por ello que las propiedades de estos elementos son compartidas. Para finalizar, el puente cuenta con barandales en sus extremos longitudinales para la seguridad de los peatones, sirviendo también como barrera de contención para los automóviles en caso de que alguno pierda el control.

Superestructura

Al igual que los manuales anteriormente analizados, un componente de gran importancia en nuestro catálogo es la superestructura, ya que esta abarca elementos estructurales como lo son las vigas principales, el arriostramiento y los dispositivos de apoyo.

La Tabla 8 explica cuáles son las propiedades que debe de satisfacer cada uno de los elementos que se consideran para la evaluación de la superestructura.

Tabla 8. Componente de la superestructura

Propiedades	Elementos	Factor	Componente
Pérdida de sección	Vigas principales	Estructural	Superestructura
Refuerzo			
Factores externos			
Conexiones			
Contaminación			

Alineamiento	Arriostramiento		
Placa rigidizante			
Pérdida de sección			
Refuerzo			
Factores externos			
Conexiones			
Contaminación			
Alineamiento			
Longitud de asiento			
Especificaciones de diseño	Dispositivos de apoyo		
Anclaje			
Pérdida de sección			

Las vigas principales son elementos que resisten las cargas del tablero transfiriéndolas a los apoyos. Al ser elementos muy largos, necesitan un elemento secundario llamado arriostramiento. El arriostramiento da un aporte estructural al elemento principal. Se encuentran entre las vigas del puente para aportar resistencia evitando la torsión de las vigas principales. Al ser elementos secundarios su evaluación no es tan estricta como la de las vigas principales. Sin embargo, el aporte estructural de estos elementos es muy alto, pues el deterioro severo de alguno de estos elementos en la estructura determina una progresión veloz en el deterioro de las vigas principales.

Para de permitir el movimiento que existe entre las vigas y los apoyos, se colocan los dispositivos de apoyos. Existe una gran variedad, pero se hace una diferenciación en dos conjuntos: 1) dispositivos de apoyo de acero, que son aquellos elementos que contienen en su estructura elementos metálicos y 2) dispositivos de apoyo de neopreno, este tipo de elemento es el más utilizado por su eficiencia y practicidad al ser colocado. La importancia de este elemento radica en la permisibilidad del movimiento entre las vigas. Como podemos identificar, en la Tabla 8 se coloca en el mismo nivel de importancia de los elementos estructurales la propiedad de longitud de asiento de las vigas. Esta propiedad consiste en el espacio que disponen las vigas para recargarse sobre los cabezales de apoyo. La necesidad de colocar esta propiedad al mismo nivel de importancia que los elementos generales es que, si un puente cuenta con longitudes de asiento más cortas de lo normado, el riesgo a un colapso es muy alto.

Subestructura

Al igual que la superestructura, la subestructura contiene principalmente elementos estructurales que son los encargados de dirigir las cargas hacia la cimentación. En este componente también se consideran las propiedades del río. Estas se clasifican en un factor funcional, pues un cambio en el comportamiento del río representa una alerta, y no un riesgo inminente de colapso. El impacto que tiene un deterioro avanzado en alguno de estos elementos estructurales es de gran importancia y es necesario ejecutar acciones de mantenimiento inmediatas para evitar comprometer la seguridad de la estructura y de los usuarios.

La Tabla 9 explica cuáles son las propiedades que deben inspeccionarse para cada uno de los elementos considerados en la evaluación de la subestructura.

Tabla 9. Componente de la subestructura

Propiedades	Elementos		Factor	Componente
Pérdida de sección	Cuerpo	Apoyos	Estructural	Subestructura
Factores externos				
Conexiones				
Pérdida de sección	Aletones			
Factores externos				
Conexiones				
Pérdida de sección	Cabezal			
Factores externos				
Conexiones				
Especificaciones de diseño				
Pintura				
Factores externos	Topes sísmicos			
Conexión				
Conformación				
Pérdida de sección				
Pérdida de sección	Cono de derrame			
Contaminación				
Daño				
Socavación		Río	Funcional	
Características del río				

Entre los elementos estructurales considerados se encuentran los apoyos, que pueden ser apoyos extremos o estribos y los apoyos intermedios. Estos dos tipos de apoyo se pueden presentar en pilas o muros. Este elemento se evalúa en tres partes: cabezal, cuerpo del apoyo y aletones en el caso de los apoyos extremos. Esta distinción entre elementos se realiza porque estos tres elementos tienen conformaciones diferentes, es por ello que pueden presentar deterioros a destiempo sin necesidad de ejecutar las acciones de mantenimiento requeridas para un solo elemento en todo el apoyo.

En el cabezal de los apoyos se encuentra el tope sísmico, que es un elemento preventivo estructural. Con esto nos referimos a que este elemento no está bajo cargas permanentes todo el tiempo, sino que previene sirviendo como un tope, en un caso de sismo, que la estructura colapse.

En algunos casos, en los estribos o apoyos extremos de un puente existen conos de derrame, generalmente cubiertos por concreto reforzado para evitar erosión. Este elemento tiene la función de retener y proteger el terreno natural de las aproximaciones del puente. En este elemento también puede existir socavación, lo cual representa un alto riesgo de colapso si este daño es severo.

Por último, se deben observar las condiciones del río. Este elemento se evalúa por los efectos que puede tener el agua sobre la estructura, principalmente en los apoyos. Es muy importante la evaluación de la propiedad de socavación, ya que esta propiedad junto con la longitud de asiento son las que definen el riesgo de colapso. A diferencia de la longitud de asiento, la socavación no se colocó en el mismo nivel que los elementos, pues en

este elemento solamente se evalúan dos propiedades, por lo que ponderar la importancia de una propiedad sobre otra es más sencillo.

Condiciones

El último componente que se evalúa en el puente son las condiciones externas. Este componente contiene propiedades funcionales y es el principal en determinar la periodicidad de las acciones de mantenimiento en un puente. En la Tabla 10 se muestran las propiedades que componen a este componente.

Tabla 10. Componente de las condiciones

Propiedades	Elementos	Factor	Componente
Exposición a humedad		Funcional	Condiciones
Zona sísmica			
Ocurrencia de sismos			
Avenidas torrenciales			
Tráfico			

La exposición de la estructura a la humedad es considerada por los deterioros que ocasiona el agua y sus minerales sobre los materiales de construcción.

La identificación de la zona sísmica en la que se encuentra la estructura es de gran ayuda para determinar periodos de inspección y de mantenimiento. En una zona de baja sismicidad, la periodicidad en la que se deben ejecutar las inspecciones será más baja que en una zona de alta sismicidad. A pesar de considerar esta condición, es necesario realizar una inspección inmediata en una ocurrencia de sismo. Por esta razón, consideramos una propiedad específica para registrar la ocurrencia de sismos en la zona de la estructura.

Una avenida torrencial es un rápido aumento del caudal de agua en ríos, arroyos y canales, causado por fuertes precipitaciones de lluvia que ocurren repentinamente de manera intensa. Los problemas causados por una avenida torrencial pueden ser: 1) sobrecarga estructural, 2) socavación, 3) acumulación de escombros y en los casos más severos 4) desplazamientos o colapso.

Por último, el análisis del tráfico es necesario para identificar un aumento inusual en las cargas sobre la estructura para ejecutar las acciones de mantenimiento necesarias para aumentar la capacidad de la estructura y evitar un deterioro progresivo.

Evaluación integral de los componentes

Los componentes drenaje, tablero, superestructura, subestructura y condiciones, se evalúan en conjunto para generar la evaluación integral, como se muestra en la Tabla 11, encontrándose en el mismo nivel de jerarquización al ser los componentes principales en los que el puente está dividido.

Tabla 11. Elementos del puente integrados

Componente	Integración
Drenaje	Puente
Tablero	
Superestructura	
Subestructura	
Condiciones	

La clasificación de los elementos del drenaje no había tomado gran importancia en ningún manual internacional analizado. Sin embargo, como anteriormente se mencionó, el drenaje en un puente es esencial para evitar deterioros prematuros en los elementos de la estructura, así como para brindar seguridad y confort al usuario al transitar. Se realizó un conjunto específico de estos elementos ya que los elementos del drenaje no existen en una sola zona específica, pueden existir en toda la estructura de un puente como lo es: en el tablero, en las aproximaciones, en los muros de los estribos o en la vía debajo de la estructura.

El componente del tablero es el segundo componente, a pesar de contener elementos estructurales, la mayoría de sus elementos son funcionales. Los elementos como la superficie de rodadura, los barandales, accesos peatonales, banquetas, guarniciones y camellones, al encontrarse en un estado avanzado de deterioro comprometen directamente a la seguridad del usuario.

En la superestructura y la subestructura todos los elementos existentes son estructurales con excepción del río, pero como se describía anteriormente, el río tiene una propiedad evaluada de suma importancia dentro de la seguridad del puente: la socavación. Esta propiedad es determinante en el desempeño del puente, pues un avance significativo en este deterioro se traduce a un riesgo muy alto en la seguridad de la estructura.

Por último, el componente de las condiciones se tomó en consideración ya que los deterioros que los materiales presentan son con base a las condiciones en las que se encuentran. Estas condiciones son las que determinan el tiempo de ejecución de inspecciones y obras de mantenimiento en la estructura.

Las calificaciones que se asignarán a cada componente con respecto a la condición integral de sus elementos, pueden ser:

- **Adecuado.** Un estado adecuado del componente indica que los elementos de este, en general, no causan ningún problema en el desempeño de la estructura. Los trabajos que se deben hacer en un componente que se encuentra en esta condición son principalmente periódicos.
- **Suficiente.** Este estado indica un desempeño limitado en los elementos del componente. Es decir, son capaces de desempeñarse dentro de los límites de diseño, sin embargo, requieren de mayor atención y de periodos más cortos entre las inspecciones o las acciones de mantenimiento de estas. Pues a partir de este estado, existe un deterioro más rápido de los elementos. En esta condición se ejecutan principalmente trabajos de mantenimiento preventivos.
- **Riesgoso.** Un componente que se encuentra en este estado requiere de atención inmediata. La condición integral de los elementos que conforman al componente indica un deterioro avanzado que

compromete el desempeño de la estructura, así como la seguridad de los usuarios. Las acciones de mantenimiento que se deben ejecutar son principalmente correctivas.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En México un activo poco evaluado por su complejidad es el puente carretero. Internacionalmente existen manuales que presentan criterios de inspección y evaluación de puentes pero que no establecen relaciones entre los elementos de cada componente para realizar la evaluación completa del puente. Además, en estos manuales no es considerada la progresión de los deterioros que existen en los componentes ocasionados por la influencia que tiene la condición de los elementos que trabajan en conjunto.

Es por ello que, en este trabajo presentamos la elaboración de un catálogo modular de los elementos de puentes de tipo losa o de viga. El catálogo se conforma de cinco niveles: propiedades, elementos, factor, componente y puente. Estos niveles se jerarquizaron con respecto al nivel de importancia que tiene cada elemento en el desempeño de la estructura, haciendo posible categorizar de forma modular todos los elementos que influyen en la condición en la que se encuentra el puente. Esta clasificación modular se realiza con el fin de facilitar la ejecución de una evaluación integral del puente con un enfoque preventivo.

Como trabajo futuro se centrarán los esfuerzos en realizar un modelo difuso de evaluación integral para puentes de losa y viga con base en el catálogo modular presentado. Además, se realizará un catálogo de acciones de mantenimiento preventivas que permita proporcionar recomendaciones de mantenimiento con respecto a la condición del puente obtenida mediante el modelo difuso de evaluación integral.

REFERENCIAS

- [1] PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVACIÓN DE CARRETERAS 2022. (2022). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Recuperado 28 de marzo de 2023, de <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/programa-de-trabajo-2022/>
- [2] Gómez Aguilar, J. (23 octubre 2020). ¿QUÉ SON ACTIVOS VIALES Y POR QUÉ ES IMPORTANTE SU GESTIÓN? TEC Tecnológico De Costa Rica. Recuperado el 17 de febrero de 2023, de <https://www.tec.ac.cr/noticias/son-activos-viales-importante-su-gestion>
- [3] Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018). Manual para Conservación de Puentes y Estructuras Similares.
- [4] Secretaría de Comunicaciones y Transportes: Antecedentes. (s. f.). Antecedentes de la Reconstrucción y Conservación de Carreteras. Recuperado 14 de febrero de 2023 <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/antecedentes/>
- [5] Ministry of Transportation (Octubre, 2000) Ontario Structure Inspection Manual (OSIM).
- [6] Grupo Técnico Convenio 587 (2006) Manual para la inspección visual de puentes y pontones.
- [7] Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) (2007) Manual de inspección de puentes. Dirección de puentes.
- [8] Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018) *Manual para inspección de puentes*.
- [9] Ministerio de Transportes y Comunicaciones República del Perú (2006) Directiva N° 01-2006-MTC/14 “GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES”. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS Y FERROCARRILES
- [10] Structural Evaluation & Bridge Management (2014) Bridge Element Inspection Manual. New Jersey Department of Transportation
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual 1st Edition
- [12] Committee of Transport Officials (2018) MANUAL FOR THE VISUAL ASSESSMENT OF ROAD STRUCTURES. South Africa COTO
- [13] SEMINARIO INTERNACIONAL DE ANÁLISIS, DISEÑO, Y CONSTRUCCIÓN DE PUENTES Y TÚNELES. SÁNCHEZ, Fernando. Universidad libre seccional Pereira. Colombia. 2015.

- [14] Gutkowski, R. M., & Arenella, N. D. (1998). INVESTIGATION OF PONTIS - A BRIDGE MANAGEMENT SOFTWARE [Investigación]. Colorado State University
- [15] Carrión, F., Quintana, A., & López, A. (2011, Octubre). Diseño y estrategia para un centro de monitoreo de puentes y estructuras inteligentes de México. Gobierno De México-Instituto Mexicano Del Transporte. Recuperado 3 de mayo de 2023, de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=357&IdBoletin=131#:~:text=A%20mediados%20de%20la%20d%C3%A9cada,%2C%20especificaciones%2C%20planos%2C%20historiales%20de>

Correo de autor de correspondencia: luis.morales@umich.mx