

Puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos fundidos in situ. Antecedentes, estado actual y tendencias del futuro en México.

Jery Ann Santana Oñate

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera civil

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ing. Civil – Ph.D. Estructuras

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Dedicatoria (Opcional)

Primero y sobre todas las cosas a DIOS, mi guía y quién ha llenado mi vida de enormes bendiciones.

A mis padres, Ángel Santana y Carolina Oñate, quienes han hecho de mí la persona que soy hoy y a quienes le debo TODO. Son mi inspiración y ejemplo de la persona que deseo ser.

Mis hermanos, Aura, Ángel y Salomé que junto con mis padres son mi motor, mi polo a tierra y mi motivación para ser mejor cada día.

A toda mi familia, no podría imaginar una mejor.

A todos mis amigos y compañeros de carrera, con quienes luchamos por sacar cada meta adelante, quienes fueron mi apoyo y compañía en este proceso. Todos con algo que ofrecer y ninguno escatimando en compartir lo mejor de sí.

A mi director de proyecto Álvaro Viviescas y todos los profesores de quienes tuve la oportunidad de aprender.

A todos aquellos que hicieron posible sacar adelante la investigación, que directa o indirectamente aportaron su conocimiento y experiencia para lograr este resultado.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo General	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. Metodología	12
3. Antecedentes	13
3.1. Definiciones	13
3.1.1. Puentes construidos por voladizos sucesivos	13
3.1.2. Sección cajón	14
3.1.3. Carro de avance	14
3.2. Historia de la tipología	15
4. Estado actual y tendencias del futuro	21
4.1. Realizaciones principales de la tipología	21
4.2. Perspectivas del futuro	22
5. Patologías asociadas a la tipología	24
5.1. Patologías en los materiales	27
5.2. Patologías estructurales	28
6. Técnicas de reparación, rehabilitación y/o reforzamiento	30
6.1. Procedimientos de conservación	30
6.1.1. Conservación rutinaria	30

6.1.2.	Conservación periódica (reparación)	31
6.1.3.	Procedimientos de reconstrucción y/o reforzamiento	31
6.2.	Monitoreo Remoto de Puentes.....	33
6.3.	Necesidad de reforzamiento de presfuerzo a lo largo de la vida útil de la estructura.....	34
7.	Criterios normativos	35
8.	Conclusiones	37
	Referencias Bibliográficas	39

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Ejemplares mexicanos de puentes doble voladizo sección cajón fundidos in situ.	21

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Puente Cimarrón en construcción. México. Fuente: Arq. Francisco Castillo	13
Figura 2 Sección cajón típica.....	14
Figura 3 Carro de avance en voladizos sucesivos.....	15
Figura 4 Puente Tuxpan en construcción.....	17
Figura 5 Puente Gilberto Borja Navarrete.	18
Figura 6 Puente Shibampo	20
Figura 7 Viaducto dovelas prefabricados proyecto Tren interurbano México-Toluca.....	23

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Fichas de inventario de puentes doble voladizo sección cajón fundidos in situ de México.

Apéndice B. Ficha SIPUMEX. Último reporte de inspección principal puente Tuxpan

Apéndice C. Entrevista Ing. Carlos Armando Gómez Trigos

Resumen

Título: Puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos fundidos in situ. Antecedentes, estado actual y tendencias del futuro en México.*

Autor: Jery Ann Santana Oñate**

Palabras Clave: puente viga cajón, voladizos sucesivos, preesforzado, fundido in situ.

Descripción: En este artículo se presenta un marco teórico sobre la tipología de puentes de voladizos sucesivos con sección viga cajón fundidos in situ en México, con el fin de reunir los aspectos más relevantes de sus antecedentes, características, evolución normativa, tendencias de futuro, patologías y técnicas de reparación, rehabilitación y/o reforzamiento; y de su evolución en general en un país con características topográficas y de desarrollo similares a Colombia. Esto, basado en una revisión de la documentación disponible, contando con el apoyo de profesionales del país mexicano referentes a la ingeniería de puentes; con lo cual se logra ampliar la información sobre el desarrollo de esta tipología en el entorno internacional, de cara a profundizar el conocimiento de los voladizos sucesivos para fortalecer la línea de investigación en comportamiento de puentes de grandes luces del grupo de investigación INME de la UIS. Según la información disponible encontrada, la tipología parece no ser de mucha evolución a pesar de presentarse realizaciones de puentes importantes de dobles voladizos en el país mexicano, por lo que no se destacan aportes de fenómenos de interés para la realidad colombiana teniendo en cuenta además que las patologías de las cuales se tiene conocimiento en este tipo de puentes son comunes y los ejemplares al parecer no han presentado daños significativos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Ing. Civil – Ph.D. Estructuras

Abstract

Title: Cast in situ box girder bridges built by balanced cantilever. Background, current status and future trends in Mexico.*

Author: Jery Ann Santana Oñate**

Key Words: Box Girder Bridge, balanced cantilever method, prestressed, cast in situ.

Description: In this article it's presented a theoretical framework on the typology of cast in situ box girder bridges built by balanced cantilever in Mexico, in order to gather the most relevant aspects of their antecedents, characteristics, normative evolution, future trends, pathologies and repair techniques, rehabilitation and / or reinforcement; and its evolution in general in a country with similar characteristics of development and topography to Colombia. This based on a review of the available documentation and the support of professionals from the Mexican country related to bridge engineering; with which it is possible to expand the information on the development of this typology in the international environment, in order to deepen the knowledge of the balanced cantilever method to strengthen the line of research in the behavior of bridges with large spans of the INME research group of the UIS. According to the available information found, the typology does not seem to be of much evolution despite finding specimens in the Mexican territory, for which reason; there are not contributions of phenomena of interest to the Colombian reality, also taking into account that the Pathologies found in these types of bridges are common and the specimens apparently have not presented significant damage.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Ing Civil – Ph.D. Estructuras

Introducción

Uno de los tipos de puentes con mayor aceptación a nivel internacional para el rango de grandes luces son los puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos debido a su buen comportamiento estructural y la posibilidad de desarrollar en la construcción una superestructura independiente de la superficie donde se ubica el puente, lo que los hace ideales para atravesar aguas profundas o depresiones considerables (Perdomo, 2011). Colombia y México son países con una topografía accidentada por los sistemas montañosos que predominan en sus territorios, y que además presentan características de desarrollo similares, creando así una oportunidad de profundizar el estudio de la tipología en el país mexicano que permita conocer mejor sus características y comportamiento de cara a ampliar el conocimiento de esta técnica y fortalecer la línea de investigación en el comportamiento de puentes de grandes luces del Grupo de Investigación de Materiales de Construcción y Estructuras. Este estudio hace parte del proyecto de investigación que actualmente adelanta el grupo INME de la Universidad Industrial de Santander (UIS) “Estimación de patologías asociadas a efectos reológicos a largo plazo en puentes viga cajón en Colombia”.

México actualmente no cuenta con un reglamento propio para el diseño de puentes, pero ha creado una serie de normas y recomendaciones a partir de los años noventa que logran adaptar las especificaciones extranjeras de países con mayor desarrollo tecnológico a las condiciones particulares del país, utilizando la normativa vigente de la AASHTO. Tanto la tipología de voladizos sucesivos como el uso del presforzado ha venido en aumento por las ventajas que representa en las etapas de construcción, donde a partir del año 2009 se tiene que un 70% de los puentes construidos son en este material (Rodríguez, 2013).

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Analizar la evolución de los puentes en concreto de sección viga cajón de grandes luces construidos por voladizos sucesivos fundidos “in situ” en México.

1.2. Objetivos Específicos

Describir las principales características del desarrollo de los puentes construidos por voladizos sucesivos en México.

Identificar las principales patologías desarrolladas por esta tipología de puentes y las respectivas técnicas de reparación, rehabilitación y/o reforzamiento.

Realizar un análisis de la evolución normativa en México para la tipología de puentes en estudio.

2. Metodología

Para la investigación se realizó una recopilación de la información disponible incluyendo libros, artículos y revistas provenientes de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, además de las normativas y datos de los sitios web oficiales de centros investigativos referentes al campo de la ingeniería civil y aquellos sitios gubernamentales de México.

Dentro de las plataformas mexicanas para la búsqueda se tuvieron en cuenta:

- Red Mexicana de Repositorios Institucionales - REMERI
- Tesis Digitales de México - INDEXE
- Tesis del Sistema Biblioteca de la Universidad Autónoma de México - TESIUNAM
- Instituto de Ingeniería - UNAM
- Repositorio Institucional Universidad Autónoma Metropolitana - DSPACE
- Instituto Mexicano de Transportes - IMT
- Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres. Asociación Civil - AMIVTAC
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural - SMIE.
- Profesionales relacionados con la ingeniería de puentes en México.

Cabe resaltar que el informe de estudio estratégico la Academia de Ingeniería México AIM (2016) menciona que a pesar de la buena calidad de investigación mexicana, la cantidad es muy reducida teniendo en cuenta el número de habitantes por investigador, el gasto en investigación, el número de trabajos publicados en revistas arbitradas y el de patentes registradas, considerando el gran número de ingenieros que ejercen la profesión y que desean adquirir conocimientos de tipo aplicado más que profundizar en teorías (pp. 43-44).

3. Antecedentes

3.1. Definiciones

3.1.1. Puentes *construidos por voladizos sucesivos*

Según la normativa mexicana (Secretaría de comunicaciones y transportes [SCT], 2004) se define como:

Puentes cuya superestructura está constituida por segmentos o dovelas prefabricados o colados en sitio mediante cimbra móvil, que se colocan sucesivamente a partir de un elemento de subestructura, formando un voladizo de longitud creciente, hasta encontrarse con el extremo de otro voladizo que parte de un elemento de subestructura adyacente, o hasta apoyarse en un estribo o en un apoyo provisional.

Figura 1

Puente Cimarrón en construcción. México.



Nota: Fuente Arq. Francisco Castillo (Comunicación personal, 16 de octubre de 2020)

Se habla de doble voladizo y voladizo sencillo dependiendo de la construcción de dovelas; si es a partir de una pila y su desarrollo es simétrico a cada lado, es doble; si la construcción en cambio es desde un estribo hasta encontrarse con el voladizo siguiente se le

llama voladizo sencillo, el segundo tipo hace uso de anclajes (tirantes provisionales) o contrapeso para equilibrar momentos.

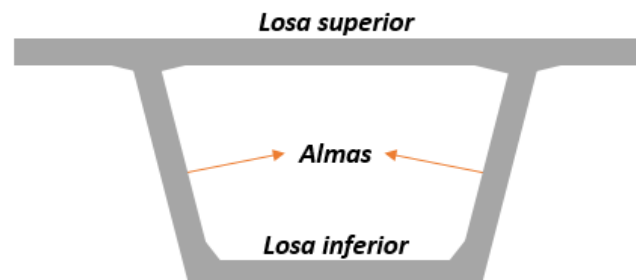
3.1.2. *Sección cajón*

Según Luna (2014-2015) es un tipo de sección transversal que se ha convertido en la más utilizada en distintas tipologías de puentes debido a su estética y espacio interno que facilita tanto la inspección como la construcción y paso de instalaciones. Esta sección consta de tres partes principales:

- Una losa inferior que cierra el circuito de torsión, aloja el pretensado y es cabeza de compresión para momentos negativos.
- Dos almas que pueden o no ser paralelas, son las que dirigen las cargas de cortante a los apoyos y también pueden alojar prefuerzo.
- Una losa superior que será la plataforma del puente, la cabeza de compresión para momentos positivos y aloja prefuerzo para momentos negativos.

Figura 2

Sección cajón típica



3.1.3. *Carro de avance*

Es una estructura auto-portante que sirve como punto de trabajo para la construcción de encofrados y fundido de las dovelas, este sistema ha sido el medio más común para la

construcción por voladizos sucesivos (Valle et al., 2017). Su utilización inicia luego de la construcción de la dovela sobre pila, a la cual es anclado el carro de avance para llevar a cabo la dovela 1, cuando esta es finalizada se desplaza la estructura y se toma como soporte la dovela recién construida para así crear el voladizo sucesivamente hasta encontrarse con el extremo siguiente. El proceso se hace a cada lado de la pila formando una T, donde se incorpora el segundo carro de avance cuando el primero es desplazado a la dovela 1.

Figura 3

Carro de avance en voladizos sucesivos



Nota: Adaptada de Alsina (s.f.) *Carros Voladizos Sucesivos*. <https://www.alsina.com/solution/carros-voladizos-sucesivos/>

3.2. Historia de la tipología

El inicio del método constructivo por voladizos sucesivos se da con la construcción del Puente Herval sobre el río Peixe en Santa Catalina en Brasil en el año 1931, una estructura de hormigón armado conformado por tres luces, siendo la principal de 68 m. en ese entonces no tuvo mucha acogida debido a que el hormigón reforzado requería de numerosas juntas transversales, por lo que no fue hasta el desarrollo de la tecnología del presfuerzo que se dieron los avances en este tipo de estructuras (López y Vanegas, 2009).

El uso del concreto preesforzado en las obras de ingeniería civil debió esperar hasta conseguir el desarrollo de concretos y aceros de alta resistencia que soportaran la aplicación de grandes fuerzas externas y la reducción de pérdidas por deformaciones diferidas a la que eran susceptibles (Secretaría de comunicaciones y transportes [SCT], 2018a). El concreto presforzado en puentes se aplica por primera vez a nivel mundial en Europa como una necesidad de reconstrucción de numerosas estructuras en el continente después de la segunda Guerra Mundial (Chao, 2015), en 1951 se construye en el puente Balduinstein sobre el río Lahn con un tramo principal de 62.1 m donde se usó satisfactoriamente un carro de avance y la tecnología del presforzado, dando así paso a los avances y gran uso a la tipología (Fernández et al., 1970). La aparición del presfuerzo para estas estructuras en México y el continente Americano, inicia con el puente Zaragoza construido en el año 1953 por ingenieros mexicanos; para este en específico se desarrolló una innovación en el sistema de anclaje de los cables, comprobando sus cálculos con pruebas de cargas sobre una viga ejemplar fundida a escala natural (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2015).

En el libro los puentes de México (2015) se describe el doble voladizo como una superestructura compuesta por dovelas construidas sucesivamente a partir de una pila de la subestructura hacia el voladizo de la subestructura adyacente, a un estribo o a una estructura provisional según sea el caso; estos segmentos pueden ser prefabricados o fundidos in situ y hacen uso de cables de preesfuerzos longitudinal (pp. 36). El desarrollo de esta técnica constructiva por doble voladizo de puentes en concreto en México empieza en 1957 con el puente sobre el río Tuxpan en Veracruz, Figura 1. Tiene una longitud total de 276 m dividida en tres luces de 92 m con una superestructura de voladizos presforzados de sección cajón, articulado en el centro del vano para permitir la dilatación y transmisión de las cargas entre voladizos

(Aragón, 2006). Con esta construcción obtuvieron la experiencia inicial para el desarrollo de estas estructuras que conforme fue dominada la técnica, lograron una reducción en el ritmo de construcción de las dovelas fundidas in situ alcanzando un tiempo de 10 días por dovela. Junto con el incremento de la industria del preesfuerzo se hizo más frecuente el uso de vigas preesforzadas, al igual que la industria de la prefabricación, lo que disminuía tiempos en los proyectos y evitaba las obras falsas en la construcción de estas estructuras.

Figura 4

Puente Tuxpan en construcción



Nota: Adaptada de Hernandez (s.f.)

La construcción de la tipología en general no tuvo desarrollo significativo sino hasta el año 2004 donde retoma las construcciones de *puentes especiales* con la autopista Durango – Mazatlán (Poon, 2018), atravesando la Sierra Madre Occidental y además con un total de 63 túneles para librar la accidentada orografía, llegando a considerarse la obra pública más relevante de los últimos años por su complejidad, costo e importancia estratégica. Uno de los puentes de doble voladizo que hacen parte del proyecto es el Neverías, está conformado por dos tramos de 90 metros hacia los estribos y una luz principal máxima de 140 m, siendo uno de los primeros con este sistema constructivo por cimbra móvil en doble voladizo de varios ejemplares similares

que se llevarían a cabo dentro de la misma autopista, como el Puente La Pinta en el año 2008 (SCT, 2015).

Dentro de todos los puentes doble voladizos construidos en el país, destaca en los últimos años el Puente Gilberto Borja Navarrete mostrado en la Figura 2, que se ha convertido en un icono de la ingeniería por su gran dimensión alcanzando los 850 m de largo y una altura de 225 m (Arribas et al. 2015). Este puente cruza el valle del río San Marcos con desniveles de hasta 800 m, completando una longitud total de 850 m con la luz máxima de 180 m y ancho de calzada 17,6 m. El trazado de la estructura en planta es curvo con un radio constante de 1.150 m y en alzado una pendiente de 5.8%. Como soluciones estructurales se tuvieron en cuenta una superestructura atirantada, tableros viga metálicos empujados y tableros construidos por voladizos; debido a la curvatura en planta de la estructura y la gran altura necesaria en las pilas fue descartada la solución de un puente atirantado, centrando así los estudios a un puente viga continua.

Figura 5

Puente Gilberto Borja Navarrete.



Nota: Adaptada de (Arribas et al. 2015).

Para la propuesta de puente empujado se evaluó un tablero mixto con luces aproximadamente a los 100 m, pero debido al complejo acceso por las laderas con pendientes

alrededor de los 45° fue definido el diseño de un puente doble voladizo sección cajón fundido in situ que facilitara el proceso constructivo. Para el análisis y cálculo de la estructura se consideraron los efectos del viento como factor determinante el empuje lateral por considerando una velocidad de 160 km/h. La necesidad de transportar el concreto a más de 200 m de altura en forma vertical obligo a usar equipos de bombeo con una capacidad de empuje de hasta 360 m en vertical, teniendo en cuenta que debían lograr una distancia horizontal de casi 100 m.

Para el rango de luces en el que se encuentra categorizado la tipología del doble voladizo, logrando su mayor eficiencia estructural 80 a 250 m, existen distintos posibles tipos de puentes como soluciones viables, siendo las características y parámetros específicos los determinan el uso entre uno u otro. En México, el doble voladizo de sección cajón comparte el rango de luz con lo son los puentes empujados y los puentes acostillados. Este último, utiliza la técnica de construcción del doble voladizo e incluso la superestructura está conformada por dovelas en sección cajón fundidas in situ mediante cimbra móvil; la diferencia radica en la ubicación del preesfuerzo dentro de la estructura ya que en esta tipología se dispone de una “costilla central” de concreto armado que tiene como función alojar el postensado longitudinal, actuando como si se tratara de un sistema atirantado amarrando el postensado a la parte superior de cada dovela (SCT, 2015).

En el contexto internacional, el puente doble voladizo de sección cajón construido solo en concreto con la luz principal más larga es el puente Stolmasundet del año 1989 en Noruega, alcanza los 301 m en la luz central, llegando a una longitud total de 467 m y un ancho de 9 m (European Expanded Clay Association, s.f.). Actualmente, el puente doble voladizo de sección viga cajón con la luz más larga se encuentra en Chongqing China, el puente Shibampo de la figura 6 terminado en el año 2006, es una estructura paralela a un puente de casi las mismas

dimensiones del año 1981. El puente cruza el río Yangtze con una longitud total de 1.080 m y presenta una luz principal de 330 m (Tang, 2010). La longitud máxima requerida para la construcción de este puente se consideró un gran reto resultando en un diseño de una superestructura híbrida en el cual la parte central de la luz es de sección viga cajón en acero y los laterales restantes en concreto, esto con la finalidad de encontrar solución ante las deflexiones significativas que ya se habían presentado en este tipo de puentes. Para el diseño también fue considerado el uso de concreto aligerado pero ante la falta de experiencia en el material fue descartado para evitar eventualidades futuras.

Figura 6

Puente Shibampo



Nota: Adaptada de Tan (2010)

4. Estado actual y tendencias del futuro

4.1. Realizaciones principales de la tipología

En la tabla 1 se encuentran enlistados algunos de los puentes representativos de la tipología en México.

Tabla 1

Ejemplares mexicanos de puentes doble voladizo sección cajón fundidos in situ.

Nombre	Año	Luz máx. [m]
Puente Tuxpan	1957	92.00
Puente Neverías	2004	140.00
Puente La pinta	2008	140.00
Puente Guamuchil II	2008	140.00
Puente Rio Rosas	2009	115.00
Puente Pueblo Nuevo	2011	122.11
Puente Paso de Piedra	2011	112.00
Puente el Nuevo	2011	72.70
Puente Cimarron	2012	-
Puente El Platanito	2012	93.00
Viaducto Xalapa	2012	145.00
Viaducto Botijas	2012	165.00
Puente Barranca del Diablo	2013	115.00
Puente Hornagal	2013	110.00
Puente Gilberto Borja Navarrete	2014	245.00
Puente Los Monos III	2014	84.00
Puente El Limón	2019	-
Puente Beltrán	2019	-
Puente Lomas Country	1999	-
Puente Tlacotalpan	-	72.00
Puente Totolapa II	-	74.00
Puente Bosques de	-	78.00

Nombre	Año	Luz máx. [m]
las Lomas		
Puente San Juan Evangelista	-	72.00
Puente Carrizal	-	84.00
Puente Las Truchas	-	-

Los puentes de mayor relevancia en el país mexicano se encuentran documentados en fichas de inventario en el Apéndice A, describiendo en ellas características principales como su ubicación, dimensiones y observaciones oportunas. Además, se presenta la entrevista realizada al Ing. Civil Carlos Gómez en el Apéndice B, ingeniero mexicano con experiencia en puentes doble voladizo y sistemas de presfuerzo.

4.2. Perspectivas del futuro

Los puentes de sección cajón postensados son cada vez menos empleados cuando se refiere a estructuras en las ciudades, optando por la prefabricación que agiliza el proceso de construcción (Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación A.C [ANIPPAC], s.f.). Sin embargo, se debe aclarar que el sistema de postensado en esta tipología tiene mayores ventajas sobre las demás por su gran eficiencia en zonas de difícil acceso, de grandes alturas, pendientes, sitios lejanos o para luces de mayores dimensiones que las pretensadas, generalmente en las zonas urbanas. La competencia directa en este rango de luces son los puentes empujados por permitir la fabricación de las dovelas por incrementos sucesivos desde un estribo, lo que hace necesario un parque de fabricación; es ahí donde tiende a decidirse el uso de las dos tipologías dependiendo de las necesidades particulares de la zona (MEXPRESA, 1993).

En las últimas realizaciones importantes de la tipología en México, resaltan las obras realizadas para el tren México – Toluca, que a pesar de no ser puentes carreteros, se proyectó el uso de dovelas prefabricadas en los puentes sección cajón preesforzados como se observa en la figura 7, y además el uso de autocimbras para el avance claro por claro fundidos in situ (Secretaría de Infraestructura de Nuevo León, 2016).

Figura 7

Viaducto dovelas prefabricados proyecto Tren interurbano México-Toluca



Nota: Adaptada de (Secretaría de Infraestructura de Nuevo León, 2016).

El proyecto contempla las soluciones de construcción de estructuras prefabricadas, teniendo en cuenta que las luces manejadas para los viaductos van desde los 30 a los 45 m. Puede indicar esto un punto de partida para el avance y estudio del uso de prefabricados en puentes de mayores dimensiones en el país.

La evolución de la tipología de mera internacional, va encaminada a la solución de las deflexiones que se han presentado en todo el mundo con este tipo de puentes debido a efectos diferidos, innovando en materiales que aseguren un buen comportamiento estructural a largo plazo. Se encuentra que en puentes dentro del rango de grandes luces, refiriéndose a mayores de 200 m, se ha optado por el uso de concreto aligerado o secciones viga cajón de acero estructural (Tang, 2010). Rensheng et al. (2016) describe otra innovación que ha venido desarrollándose: el

concreto de ultra-alto desempeño UHPC (Ultra-high Performance Concrete), el cual ha mostrado características mecánicas exitosas, un alto modulo elástico, excelente resistencia a compresión y bajos coeficientes de creep y shrinkage (Fluencia y retracción). Con el UHPC se disminuye en 50% y hasta un 60% el peso muerto, reduciendo el espesor de las placas en la viga cajón considerablemente. Con estas mejoras se busca lograr luces de hasta 400 m reduciendo del peso en las luces de estos puentes en esta tipología, llevándola a competir con los puentes atirantados. Este material ha tenido su estudio y experimentación en México, como el desarrollo de un concreto de ultra alto rendimiento con bajo contenido de humo de sílice y agregados de caliza; mezclas que se realizaron con arena caliza regular en sustitución de los agregados de cuarzo común buscando con esto un UHPC de menos costo (Hernández et al., 2016).

5. Patologías asociadas a la tipología

Cuando se habla de patologías se hace referencia al estudio sistemático y científico de las causas de las deficiencias, defectos y fallas en una estructura; en este caso, de los puentes. De igual manera el concepto abarca las formas y técnicas de prevención, detención y corrección (Sánchez, 1996).

La principal patología asociada a esta tipología se evidencia con excesivas deflexiones en centro de luz por consecuencia de los efectos diferidos a largo plazo (Rincón, 2019). La importancia de la evaluación de esta patología ha sido reconocida en la literatura internacional y por lo cual han surgido estudios y procedimientos para el cálculo además de soluciones en el diseño, ya que una subestimación en estos efectos puede dar paso a pérdidas y puentes inseguros. La pérdida de presfuerzo a largo plazo es la suma de las pérdidas debidas a fluencia y retracción del hormigón,

y la relajación del acero (Kamatchi et al., 2014). El flujo plástico es un fenómeno dependiente del tiempo, a medida que pasa el concreto cede ante la presión ejercida sobre él; por otro lado la retracción se da debido a la pérdida de agua que provoca un cambio en el volumen y en consecuencia el acortamiento de la longitud del acero disminuyendo así su tensión .

La primera acción para la conservación de los puentes es la realización de actividades de inspección que permitan estimar la condición en la que se encuentra la estructura y todos sus componentes (SCT, 2018a). Se clasifican en las siguientes tipos o niveles:

Inspección visual: observación de los elementos del puente que no requiera de medios especiales auxiliares para su desarrollo.

Inspección visual de puentes especiales: dentro de esta categoría se encuentra la tipología de estudio; esta inspección precisa el mismo objetivo que la inspección anterior pero su complejidad aumenta al ser un procedimiento que busca un levantamiento de cantidades de conceptos de obra para la conservación menor o preventiva que resulte en un catálogo de conservación con sus respectivas especificaciones y costo.

Inspección detallada: se lleva a cabo tanto en puentes tradicionales o especiales, usualmente es realizada después de una inspección visual que según sus resultados hace necesario un estudio más a fondo de la estructura. Este tipo de inspección puede ser programada periódicamente para los puentes especiales sin necesidad de una inspección visual previa, dada la importancia de los puentes que conforman esta categoría.

Los puentes mexicanos son administrados mediante el Sistema de Puentes de México SIPUMEX como sistema de gestión para la conservación y mantenimiento de aquellos que hacen parte de la red carretera federal libre de peaje (Secretaría de comunicaciones y transportes [SCT], s.f.).

Tomando como referencia el puente Tuxpan, siendo este el primer puente de la tipología construido en México, se han llevado a cabo distintas inspecciones pero hasta el momento ningún reforzamiento o reconstrucción de la estructura, según su última inspección presentada en el Anexo 2 la estructura ha tenido descascaramientos y por lo tanto colocación de carpeta o riego de sello, el herraje de las juntas se encontró suelto por vibración de los autos al pasar y escurrimiento por drenes; como procesos rutinarios requirió limpieza y pintura. Dicha inspección se realizó el año 2017 y fue programada la siguiente para el 2022.

De manera general y según la experiencia de profesionales (Apéndice C) referentes de los puentes doble voladizo, las patologías y fallas comunes en este tipo de estructuras son:

- Problemas con el control geométrico.
- Mala aplicación del postensado.
- Mala protección de los cables de presfuerzo.
- Bajo criterio de durabilidad
- Escaso recubrimiento
- Concretos porosos
- Falta de mantenimiento rutinario

Ese tipo de fallas llegan a generar problemas mayores a futuro. La patología que más se evidencia en los puentes mexicanos es la corrosión del acero de presfuerzo tanto a largo plazo como en etapas de construcción, esto es un problema que afecta luego la capacidad estructural. Por otro lado, el mal seguimiento a los procesos de aplicación de preesfuerzo o desconocimiento de la técnica que pueden generar problemas del control geométrico se den diferencias al llegar a encontrarse los voladizos haciendo que se generen mayores esfuerzos buscando que se logue la unión entre ellos.

A continuación se condensan las patologías hasta ahora revisadas en las inspecciones en México según el comportamiento de materiales y de la estructura, así como técnicas de rehabilitación, reparación y/o reforzamiento, siendo las más frecuentes y teniendo en cuenta que la tipología no ha presentado daños o fallas importantes en el país según lo descrito por la Secretaria de comunicaciones y transportes de México (2018b) y Gonzales et al. (2016).

5.1. Patologías en los materiales.

Según el tipo de material usado para la tipología se pueden presentar las siguientes patologías:

Mortero: la disgregación del mortero ocasionados normalmente por mala dosificación en sus componentes. El mortero para resane del concreto reforzado o preesforzado es tipo epóxico; que puede fallar debido a vencimiento del material al momento de su preparación.

Concreto: disgregación de los agregados, fisuras, grietas o descascaramientos, que pueden ser por uso de cemento de mala calidad, agua contaminada, suciedad en los agregados, mala granulometría especificada, entre otros.

Concreto asfáltico: son daños referentes a deformaciones que pueden causar daños mayores como baches, desprendimiento de carpeta, grietas y/o deformaciones excesivas.

Acero de refuerzo: el deterioro principalmente es debido a la corrosión que puede ocasionar pérdidas de sección importantes que disminuyan la capacidad de carga, para contrarrestarlo se añade acero de refuerzo adicional al dañado o preesfuerzo exterior.

Acero de preesfuerzo: el sistema de postensado tiene mayor exposición que el pretensado. Si ocurre una mala inyección de lechada o resinas en los ductos de preesfuerzo, puede aparecer corrosión o problemas de filtraciones.

5.2. Patologías estructurales

Se presentan a continuación las patologías según su ubicación y la funcionalidad de los elementos que conforman la estructura.

Cimentación

- Asentamientos
- Socavación
- Discontinuidades: grietas, descascaramientos o deformaciones.
- Deterioro de cabezas de pilotes hincados o fundidos en el lugar con excavación previa:
- Deterioro por corrosión de pilotes fundidos con camisas metálicas en zonas marítimas

Subestructura

- Acero expuesto (Corrosión)
- Desplome: pérdida de la verticalidad de un elemento.
- Descascaramiento: pérdida de revestimiento o sección estructural de concreto que puede ser superficial o llegar a la exposición de refuerzo y grades dimensiones.
- Grietas o fisuras: grietas por elementos mecánicos superiores a la resistencia del elemento o por otras causas. En las de primer tipo debe evaluarse si son activas o no usando testigos.
- Separación de los componentes al interior del concreto, puede ser por ataque químico en ambientes cercanos a cuerpos de agua.

Superestructura

- Descascaramiento
- Fracturas en losas
- Acero expuesto en vigas o losas
- Grietas/fisuras en vigas de concreto
- Grietas en losas: lineales son por cargas vivas y muertas; dos direcciones por cargas cíclicas.
- Eflorescencia en la losa de concreto: mancha blanca debida al cloruro de calcio traído por el agua.
- Corrosión
- Cables fallados de traves reforzadas con presfuerzo externo

Superficie de rodamiento

- Baches: en el concreto hidráulico puede tener o no acero expuesto.
- Exceso de espesor de la carpeta asfáltica
- Identación: encajamiento de objetos duros.
- Pulido (pulimento): desgaste acelerado.
- Ahuellamiento (roderas): asentamiento las huellas de los vehículos.
- Agrietamiento
- Fisuramiento por retracción en concreto hidráulico
- Fragmentación de losa
- Juntas en mal estado, cubiertas por asfalto, o sello destruido.

Elementos complementarios y de operación de la estructura

- Drenes taponados o falta de extensión de drenes

- Drenes mal ubicados
- Erosión en los terraplenes o taludes
- Terraplenes destruidos
- Hundimientos o deformaciones en zonas de acceso
- Daños en el equipo de alumbrado del puente y banquetas de peatones
- Falta o deterioro de parapetos, defensas metálicas y señalización en el puente

6. Técnicas de reparación, rehabilitación y/o reforzamiento

6.1. Procedimientos de conservación

Luego de la inspección se determina los procedimientos de conservación que requiere la estructura para mantenerla en buen estado.

6.1.1. Conservación rutinaria

Los trabajos cotidianos de carácter preventivo que recibe la estructura con el fin de mantener buenas condiciones en su operación:

- Limpieza y pintura de los elementos de la estructura
- Sellado, reposición y/o extensión de drenes.
- Sellado de grietas en la superficie de rodamiento y bacheo superficial
- Pintura anticorrosiva para dispositivos de apoyo.
- Protección contra intemperismo a base de espuma de poliuretano en dispositivos de apoyo.

6.1.2. Conservación periódica (reparación)

- Bacheo superficial
- Reparación de descascamiento superficiales e sellado de fisuras
- Fresado y reconstrucción de superficie de rodadura.
- Reparación y resanes superficiales del recubrimiento o reparaciones de la sección completa de elementos de concreto, incluyendo tratamiento para eliminar la corrosión del acero de refuerzo.
- Construcción o reparación de fracturas en las losas de protección de los conos de derrame.
- Reparaciones en el concreto y el acero de refuerzo
- Construcción o reparación de revestimiento en taludes.
- Renivelación de accesos
- Colocación o reposición del sello en juntas de dilatación (parcial o total).
- Reposición de elementos de seguridad y señalamiento

6.1.3. Procedimientos de reconstrucción y/o reforzamiento

Estos procedimientos están sujetos a la necesidad de un aumento de la capacidad resistente del puente, por aumento de cargas, reparaciones o refuerzo por deterioro natural y requieren de planeación de proyectos para realizarlos.

Superficie de rodamiento:

- Sustitución de juntas de calzada.
- Reacondicionamiento de la superficie de rodamiento removiendo la carpeta actual e implementando una nueva superficie.

Superestructura:

- Reforzamiento de superestructura. Puede ser con fibras de carbono, presfuerzo longitudinal, transversal y/o vertical.
- Sustitución de elementos en puentes.

Subestructura:

- Encamisado de Pilas
- Reforzamiento de corona y cabezales con presfuerzo, fibra de carbono o alguna estructura metálica externa.
- Adición de una estructura

Cimentación:

- Aumento de sección en pilotes o zapatas
- Adición de pilotes
- Refuerzo mediante micropilotes
- Protección con tablestacas
- Enrocamiento: colocación de rocas alrededor de la subestructura que no sean arrastradas por la corriente.

Elementos complementarios y de operación de la estructura:

- Sustitución de dispositivos de apoyo
- Recargue de material en terraplenes que han sido desprendidos para evitar problemas de inestabilidad.
- Construcción o remplazo de losa de acceso.

- Protección con capa de mampostería de piedra, muros gaviones, geotextil o tablestacas

6.2. Monitoreo Remoto de Puentes

En México, aún no se cuenta con una plataforma de monitoreo estructural que automáticamente emita una alarma en caso de presentarse alguna irregularidad con la estructura pero se han presentado propuestas para dicho fin. Sin embargo, el Instituto Mexicano de Transporte [IMT] (2016) ha procurado establecer metodologías para la instrumentación y monitoreo permanente en puentes que son de gran importancia para el país mediante el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CEMPEI). El IMT ha clasificado el monitoreo remoto en tres tipos:

Monitoreo Continuo: una instrumentación permanente en la estructura que es adherido rígidamente o embebido en la estructura, comparando así las señales arrojadas por el sistema de monitoreo respecto a la respuesta dinámica generada con un modelo de elementos finitos.

Monitoreo Puntual: pruebas de carga que se realizan con el propósito de estimar la capacidad y comportamiento real de la estructura y además, detectar, cuantificar y localizar los daños y vida útil de la misma.

Monitoreo de la integridad estructural: (Structural Health Monitoring) parte de la concepción de los sistemas estructurales inteligentes que busca la detección automática de anomalías, procesamiento de la información y una reacción o adaptación ante el evento, enviando una señal con base en la información recolectada y analizada por el sistema.

Este sistema es primordialmente pensado para su aplicación en los puentes especiales o en puentes con problemáticas durante su construcción u operación, en el 2016 ya se contaba con los puentes Papaloapan (atirantado), Mezcala (atirantado) y Chiapas (Empujado) con monitoreo

permanente, el puente Baluarte (atirantado) parcialmente instrumentado y cinco enlazados por satélite y con instrumentación reducida (Carrión y Quintana, 2016).

6.3. Necesidad de reforzamiento de presfuerzo a lo largo de la vida útil de la estructura

Dentro de las patologías descritas no se mencionan los deterioros ocasionados en el concreto preesforzado debido a los efectos diferidos. Sin embargo, las recomendaciones dadas en la normativa mexicana para los proyectos de puentes especiales presentan la necesidad de tener en cuenta la pérdida de presfuerzo a largo plazo.

La pérdida de presfuerzo tiene como causa los fenómenos físicos asociados al comportamiento inelástico de los materiales que componen el presfuerzo y dependen del tiempo de servicio (Romoaldo et al., 2012). Pueden clasificarse en tres tipos de pérdidas: por contracción o retracción del concreto, por flujo plástico del mismo y por relajación del presfuerzo (Hernández, 2017).

En el capítulo del diseño a flexión para dobles voladizos en la Normativa SCT (2004) se encuentra descrita la necesidad a futuro de incluir presfuerzo adicional por eventualidades no previstas, se establece que en las superestructuras de sección cajón la inclusión de ductos adicionales vacíos para momentos positivos y negativos que sean igual al 10% de los ductos colocados por requerimientos de cargas. Su ubicación preferiblemente debe ser en las cartelas de las esquinas donde se unen las almas con la losa superior e inferior, con terminaciones de bloques con dimensiones suficientes para alojar los anclajes necesarios en el momento de proporcionar a la estructura el acero de presfuerzo adicional, posicionándolos siempre al interior de la sección.

7. Criterios normativos

La reglamentación para la construcción de puentes actualmente está bajo la responsabilidad de la entidad gubernamental denominada Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT) a través de la Subsecretaria de infraestructura descrita en la página web de la SCT (2020) como la encargada de preservar la red carretera federal, desarrollar una infraestructura moderna, segura y de calidad para aumentar la competitividad de la economía, mejorar la comunicación en el territorio, impulsar el desarrollo nacional y regional del país mexicano; y así prestar un mejor servicio al usuario de las carreteras.

En 1984, se publica la traducción de la primera parte de la duodécima edición de las especificaciones AASHTO para puentes denominándolas como *Normas Técnicas para el Proyecto de Puentes Carreteros* (Secretaria de comunicaciones y transportes [SCT], 1984), en esa instancia, la utilización de estas especificaciones se consideraba práctica común en el país mexicano, sin embargo se aclaró en la normativa que debían realizarse las evaluaciones necesarias para su aplicación y no debían considerarse como reglas rígidas debido a que sus criterios correspondían los requerimientos estadounidenses (pp.4). En esta traducción se encuentra el Capítulo VI de Elementos de Concreto Presforzado, donde se tienen en cuenta las pérdidas de preesfuerzo como Pérdida total, una sumatoria de las pérdidas causadas por: contracción, acortamiento elástico, escurrimiento plástico del concreto y la relajación del acero de preesfuerzo, sin incluir las pérdidas por fricción que se calcula de manera individual. En 1999, se publica La Normativa para la Infraestructura del Transporte (Normativa SCT) por la SCT (1999) y está conformada por criterios, métodos y procedimientos que permiten uniformizar el estilo y calidad de las obras públicas, además de orientar la selección y aplicación de los criterios

y procesos más convenientes para llevar a cabo los estudios y proyectos en las etapas de construcción, conservación, reconstrucción y modernización. Las normas para los proyectos de puentes están basadas las siguientes reglamentaciones:

- American Concrete Institute, ACI 343R-95. Analysis and Design of Reinforced Concrete Structures. Capítulo 2.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc. (AASHTO), Standard Specifications for Highway Bridges, (1996) y (2002)
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), Normas Técnicas para el Proyecto de Puentes. (1984).
- LRFD, Bridge Design Specifications. AASHTO, EUA, 1ª Ed, (1994)

En la Normativa SCT se encuentra un aparte específico para proyectos de puentes y estructuras publicado en el año 2001 con el título de *Proyectos de Nuevos puentes y Estructuras Similares*, conformado inicialmente con el desarrollo de los siguientes capítulos (en paréntesis la última versión existente):

001. Ejecución de Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares (2001).

002. Características Generales de Proyecto (2001).

003. Cargas y Acciones (2001).

004. Viento (2001).

005. Sismo (2001).

006. Combinaciones de Cargas (2016).

Con esta reglamentación se logra una mejor adaptación de las especificaciones a las características de las necesidades del país mexicano, como la formulación de la norma de cargas vehiculares para el diseño estructural debido a que las cargas establecidas en el reglamento de la

AASHTO producían momentos flexionantes y fuerzas cortantes para diseño bastante inferiores a los que transitan por las carreteras mexicanas (Rascón, 2004).

A partir de esta primera entrega se sigue con un proceso de actualización y complementación a la norma, con lo que lleva al año 2004 la publicación del Capítulo 8, un apartado específicamente para *Puentes Especiales* donde se incluye la tipología de los dobles voladizos, junto con los puentes atirantados, arco y empujados (SCT, 2004). Con las modificaciones realizadas desde su creación se tienen los siguientes capítulos adicionales que regulan actualmente los proyectos de puentes:

007. Distribución de cargas (2016).

008. Consideraciones para puentes especiales (2004).

009. Presentación del proyecto de nuevos puentes y estructuras similares (2004).

8. Conclusiones

México cuenta con referentes importantes de puentes construidos por voladizos sucesivos de sección cajón fundidos in situ, destacando entre ellos por las dimensiones que presenta el puente Gilberto Borja Navarrete. Estos tipos de puentes están clasificados como *Puentes Especiales* por la importancia que tienen dentro el territorio, con un nivel de estudio más profundo para especificaciones de diseño, planificación, construcción e incluso inspecciones y conservación haciendo uso de sistemas de monitoreo permanente que han ido desarrollando en la última década. A pesar de esto, la producción científica acerca de la temática es escasa, enfocándose la práctica más al mejoramiento de las técnicas constructivas que en el desarrollo e innovación de las tipologías en general.

En México la tipología comparte su rango de aplicación con los puentes empujados, donde los de voladizos sucesivos tienen la ventaja cuando la zona es de difícil acceso y no es posible la fabricación de dovelas desde un estribo; también se encuentran los acostillados pero su desarrollo es reciente. La prefabricación de dovelas ya se desarrolla en el territorio mexicano hasta el momento con los puentes ferroviarios de luces menores a las estudiadas, pero que al ser puentes de gran longitud permiten la industrialización.

En tanto a las tipologías, según sus normas se puede evidenciar que se tienen en cuenta los efectos diferidos en la etapa de diseño de las estructuras, estipulando la ubicación de ductos vacíos para preesfuerzo adicional desde el momento mismo de la construcción, para así facilitar el proceso de reforzamiento que puede llegar a presentar la estructura debido a eventualidades no previstas en los cálculos. Cabe resaltar que la normativa para el diseño de puentes son recomendaciones para la adaptación de las normas extranjeras, especialmente AASTHO. Las patologías encontradas en los puentes son comunes y no han presentado daños significativos en los puentes doble voladizo del territorio.

A pesar de encontrar realizaciones de la tipología de dobles voladizos en México, según la información disponible, parece no ser una técnica de mucha evolución en el país por lo que en consecuencia no se destacan aportes científicos de fenómenos de interés para la realidad colombiana como el comportamiento de los efectos diferidos y el monitoreo continuo. Sin embargo, sería conveniente trabajar en colaboración con universidades mexicanas y/o el IMT para conocer en mejor detalle el desarrollo de esta tipología en ese país.

Referencias Bibliográficas

- Perdomo, M. G. (2011) *Estudio Comparativo De Puentes Construidos Por Voladizos Sucesivos* [Tesis de Maestría, Universitat politecnica de Catalunya]
- Rodriguez, D. (2013) *Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto preesforzado con agrietamiento* [Tesis de Maestría, Universidad Autonoma de Queretano] <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/351>
- Jaime, A., Gómez, M. y Ayala, G. (2016) *Estudio Estratégico: La ingeniería civil mexicana, estado actual y acciones para enfrentar los retos del Siglo XXI* [Archivo PDF] Academia de Ingeniería de México. https://www.ai.org.mx/sites/default/files/est._act._y_acc._ic_ai.pdf
- Secretaria de comunicaciones y transportes. (2004). *Normativa sobre el proyecto de carreteras. Parte 6: Proyecto de Puentes y Estructuras; titulo 1: Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras similares; Capitulo 8: Consideraciones para puentes especiales. (M.PRY.CAR.6.01.008/04).* <https://normas.imt.mx/normativa/N-PRY-CAR-6-01-009-04.pdf>
- Luna Oliva, C. (2014-2015) *Análisis y dimensionamiento de puentes construidos por avance de cimbra* [Archivo PDF] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90214/fichero/TFG+Carlos+Luna+Oliva.pdf>
- Valle, R., Carvajal, N.F. y Botero, J.C. (2017) *Evolución de los parámetros geométricos de diseño en puentes construidos con voladizos sucesivos in situ. UIS Ingenierías*, 16(1), 85-100. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n1-2017009>

- Fernández, C., Manterola, J. y Fernández, L. (1970) *Construcción de Puentes por Voladizos Sucesivos mediante Dovelas Prefabricadas*. *Revista de Obras Públicas*. 117(3063), 715-730.
- López, E. y Vanegas, S. (2009) *Sistemas constructivos en puentes con pretensado extradadoso, Estado del arte* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]
- Secretaría de comunicaciones y transportes México. (2018a) *Manual para inspección de puentes* [Archivo PDF]
[http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual de Inspecci%C3%B3n de Puentes/Manual de Inspeccion de Puentes.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Inspecci%C3%B3n_de_Puentes/Manual_de_Inspeccion_de_Puentes.pdf)
- Chao E. (2015) *Puentes de concreto en el desarrollo del México del siglo XX* [Archivo PDF]
<http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/septiembre2015/fuga.pdf>.
- Yepes Piqueras, V. (2017, 28 de septiembre). Introducción a la técnica de construcción de puentes por voladizos sucesivos. *El blog de Víctor Yepes*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/puente-de-balduinstein/>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015) *Los Puentes de México 1985- 2014*. Biblioteca Mexicana del Conocimiento.
- Aragon Cárdenas, J. (2006) *Aspectos generales de construcción de puentes en doble voladizo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/3452912>
- Hernández, C. (s.f.) *La construcción del emblemático Puente Tuxpan* [Fotografía]. Variedades.
<https://www.variedades.com.mx/2020/01/la-construccion-del-emblematico-puente.html>

- C. Poon Hung. (2018, 19 al 21 de abril) *Puentes de México*. [Ponencia] V Seminario Internacional de Puentes. Campeche, México. <http://www.amivtac.org/vsip/assets/7.-clemente-poon.pdf>
- Arribas Mazarracína, D., González Esteban, J., Pérez Casas, J. y Bernal Sahún, P. (2015) Viaducto Gilberto Borja Navarrete. *Hormigón y Acero*, 66(275). <http://www.hormigonyacero.com/index.php/ache/article/view/1905>
- European Expanded Clay Association Asbl (s.f.) Stolmasundet Bridge. <https://www.exca.eu/light-projects/2302/>
- Man-Chung Tang (2010) The New Shibampo Bridge, Chongqing, China. *Structural Engineering International*, 20(2), 157-160. <https://doi.org/10.2749/101686610791283533>
- Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación A.C ANIPPAC (s.f.) *Capítulo 4. Diseño de puentes con elementos prefabricados y presforzados* [Archivo PDF] <https://anippac.org.mx/demos/cap03.pdf>
- MEXPRESA (1993). *Construcción de Puentes de concreto mediante el sistema de lanzamiento por incrementos sucesivos* [Archivo PDF]. https://www.mexpresa.com/pdf/puentes_empujados.pdf
- Secretaría de Infraestructura de Nuevo León (2016, 23 y 20 de noviembre - 7 y 14 de diciembre). *Proyecto para el tren interurbano México –Toluca* [Ponencia]. Seminario de Infraestructura ferroviaria en México. Ciudad de México. México. https://www.cmic.org.mx/cmic/eventos/infraestructuraferroviaria/ponencias/Dia4/1-161214_CMIC_Tren_Interurbano_M%C3%A9xico_Toluca.pdf

- Pan, R., Shao, X., y Zhan, H. (2014, 3 al 5 de septiembre) Innovative *Longitudinal Prestressed Continuous Ultra-high Performance Concrete Box-girder Bridge* [Artículo] 37th IABSE Symposium Madrid 2014. Vol. 102.
- Hernández, G., Durán, A. y Valdez, P. (2016, 22 al 24 de agosto). *Ultra high performance concrete (UHPC) with low silica fume contents and limestone aggregates* [Artículo]. International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
https://www.researchgate.net/publication/309548854_ULTRA_HIGH_PERFORMANCE_CONCRETE_UHPC_WITH_LOW_SILICA_FUME_CONTENTS_AND_LIMESTONE_AGGREGATES
- Sánchez Sánchez, A. (1996) *Inspección, Mantenimiento y rehabilitación de puentes. Tipología de daños en puentes*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kamatchi, P., Rao, K. B., Dhayalini, B., Saibabu, S., Parivallal, S., Ravisankar, K. y Iyer, N. R. (2014) Long-Term Prestress Loss and Camber of Box-Girder Bridge. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 111(6), 1297-1306. DOI: 10.14359/51686913
- Rincón, L. (2019) *Estimación de patologías asociadas a efectos reológicos a largo plazo en puentes viga cajón en Colombia*. [Tesis maestría]. Universidad Industrial de Santander.
- Secretaría de comunicaciones y transportes (s.f.) *LIBRO BLANCO Programa de Reconstrucción y Conservación de Carreteras del Programa Nacional de Conservación de Carreteras incluyendo los Proyectos de Asociación Público Privadas*. [Archivo PDF]
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/Transparencia/rendicion-de-cuentas/LB/12_LB.pdf
- Secretaría de comunicaciones y transportes México (2018b) *Manual para la conservación de puentes y estructuras similares*. [Archivo PDF]

http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Conse rvaci%C3%B3n_de_Puentes/Manual_de_Conservacion_de_Puentes.pdf

González, R., Aguilar, J., Narcía, C., De Coss, E., & Cruz, R. (2016) Estado del arte de técnicas de reparación de puentes. *Pakbal* (37), 15-20.

https://www.ingenieria.unach.mx/images/Articulos_revista/pakbal-37_pag.15-20.pdf

Instituto Mexicano del Transporte (2016) *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*. Publicación Técnica No. 464.

<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt464.pdf>

Carrión, F.J. y Quintana, J.A. (2016) Relevancia del monitoreo estructural ante contingencias. El puente del río Papaloapan. *Vías Terrestres*, No. 42, Julio-Agosto, 4-8.

<http://www.amivtac.org/revistas/VT42.pdf>

Romoaldo, C., Escobar, J.A. y Gomez, R. (2012, 21 al 23 de octubre) *Estimación indirecta del nivel de presfuerzo actuante en vigas en servicio* [Artículo] XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Acapulco, Guerrero. http://b-dig.iie.org.mx/BibDig2/P12-0434/07/07_12.pdf

Hernández, G. (2017) *Metodología para la estimación de la fuerza efectiva de presfuerzo en estructuras existentes* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana.

http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/6226/Metodologia_para_la_estimacion_de_la_fuerza_Hernandez_Juarez_G_2017.pdf?sequence=1

Secretaría de comunicaciones y transportes (15 de septiembre de 2020). *Subsecretaría de Infraestructura* <http://www.sct.gob.mx/carreteras/>

Subsecretaría de Infraestructura Mexico (1984) *Normas Técnicas para el Proyecto de Puentes Carreteros*. [http://dimsec.com/wp-content/uploads/2017/08/PUENTES-CARRETEROS-](http://dimsec.com/wp-content/uploads/2017/08/PUENTES-CARRETEROS-1.pdf)

[1.pdf](http://dimsec.com/wp-content/uploads/2017/08/PUENTES-CARRETEROS-1.pdf)

Secretaria de comunicaciones y transportes México (1999). *Normativa sobre la introducción. Parte 1: Propósito de la Normativa para la Infraestructura del Transporte (N.INT.1/99)*.

<https://normas.imt.mx/normativa/N-INT-1-99.pdf>

Rascón, O. (2004) *Formulación de la norma SCT de cargas vehiculares para diseño estructural de puentes carreteros*. Publicación técnica, 243. Instituto Mexicano de Transportes.

<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt243.pdf>