

**PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS
PATOLOGÍAS, TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO, REPARACIÓN Y
REHABILITACIÓN DE PUENTES EN CONCRETO CONSTRUIDOS POR EL
MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS PARA GRANDES LUCES EN
COLOMBIA: ESTADO DEL ARTE**

DANIELA PATRICIA TAVERA DIAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS
PATOLOGÍAS, TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO, REPARACIÓN Y
REHABILITACIÓN DE PUENTES EN CONCRETO CONSTRUIDOS POR EL
MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS PARA GRANDES LUCES EN
COLOMBIA: ESTADO DEL ARTE**

DANIELA PATRICIA TAVERA DIAZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES

Ingeniero Civil - Ph. D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

Agradecimientos

A mi director de proyecto, Álvaro Viviescas Jaimes, por su continua guía, apoyo y confianza durante los últimos años, por darme las herramientas necesarias para culminar este proyecto y enamorarme de mi profesión.

A toda mi familia, en especial a mi papa y mi mama por ser el continuo motor y guía en todos los proyectos de mi vida.

Por último, quiero agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme el espacio para desarrollarme como persona y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. ESTADO DEL ARTE	16
1.1 TIPOLOGÍAS DE PUENTES	16
1.1.1 Puente Arco	16
1.1.2 Puentes viga	17
1.1.3 Puentes pórtico	18
1.1.4 Puentes colgantes	18
1.1.5 Puentes atirantados	19
1.2 PUENTES VIGA-CAJÓN EN CONCRETO CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS	21
1.2.1 Sección viga-cajón	22
1.2.2 Voladizos sucesivos: proceso constructivo	24
1.2.3 Carro de avance	26
1.3 ANTECEDENTES EN COLOMBIA	28
1.4 PATOLOGÍAS	31
1.4.1 Patologías generales	33
1.4.2 Patologías y problemas propios de la tipología	39
1.4.3 Formas y mecanismos de manifestación de las patologías	60
1.5 TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO, REPARACIÓN Y REHABILITACIÓN UTILIZADAS EN LOS PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS EN CONCRETO POR EL MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS	66
1.5.1 Técnicas de protección y mantenimiento	68
1.5.2 Técnicas de reparación, reforzamiento y rehabilitación	69
1.5.3 Guía metodológica para el diseño de reparaciones estructurales y refuerzo del CEREMA	76
2. FICHAS TÉCNICAS	77
3. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	78
4. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	79
REFERENCIAS	81
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Puentes en arco de concreto sobre el río de Oro, vía Girón-Bucaramanga, Santander, Colombia.	17
Figura 2. Puente viga-cajón Guillermo Gómez Ortiz, vía Girón-Zapatoca, Departamento de Santander, Colombia.	18
Figura 3. Puente de Occidente, Departamento de Antioquia, Colombia.	19
Figura 4. Puente atirantado de la isla Russki sobre el estrecho del Bósforo oriental, Rusia.	20
Figura 5. Puente de Balduistein, primer puente construido en el mundo por el procedimiento de avance en voladizo sucesivo realizado in situ.	22
Figura 6. Sección transversal cajón y sus elementos.	23
Figura 7. Vista de la sección longitudinal de un puente por etapas: (a) dovela inicial o 0, (b) dovelas finalizadas, (c) dovela en construcción.	26
Figura 8. Sección transversal de un carro de avance de voladizos.	27
Figura 9. Carro de avance del puente Guillermo Gómez Ortiz.	28
Figura 10. Distribución de los materiales principales de la superestructura.	31
Figura 11. Tipología de la corrosión del acero. (A) vista superior, (B) vista lateral.	39
Figura 12. Componentes del esfuerzo del concreto bajo cargas de larga duración.	43
Figura 13. (a) Puente de Koror-Babeldaob en Palaos en 1977; (b) Vista lateral del puente después de su colapso en 1996.	44
Figura 14. Daño en junta entre losa de aproximación y tablero. Puente el Tapón.	52
Figura 15. Detalle de un “Blíster”	53

Figura 16. Sección transversal típica de una dovela de un puente viga-cajón.	53
Figura 17. Ducto de un cable de presfuerzo expuesto en la losa inferior.	54
Figura 18. Vista del puente N. S. Guía y su sección transversal de doble celda.....	55
Figura 19. Vista longitudinal del puente.	57
Figura 20. Agrietamiento del concreto y falla y separación transversal de los ductos de los cables de pretensado en la losa inferior.....	58
Figura 21. Ubicación del refuerzo de la losa inferior de la dovela de cierre del puente.	59
Figura 22. Inclinación del primer voladizo del viaducto sobre el Viosne (Francia, 1970).	60
Figura 23. Secciones transversales incluidas en el catálogo del DTecITM.	61
Figura 24. Diagrama de momentos y patrón de agrietamiento de la sección longitudinal de una viga-cajón continua.	65
Figura 25. Presfuerzo transversal adicional de la losa inferior.....	70
Figura 26. Presfuerzo vertical adicional en el alma y presfuerzo transversal de la losa inferior.	71
Figura 27. Sistema de reparación por medio de la suspensión de la losa inferior.	74
Figura 28. (a) Técnica de reforzamiento a cortante con tendón único de refuerzo en el alma. (b) Técnica de reforzamiento a cortante con tendones dobles de refuerzo en el alma.	75
Figura 29. Distribución de los materiales principales de la superestructura.	113
Figura 30. Componentes del esfuerzo del concreto bajo cargas de larga duración.	120
Figura 31. (a) Puente de Koror-Babeldaob en Palaos en 1977; (b) Vista lateral del puente después de su colapso en 1996.	121

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Penetración del frente de carbonatación en el hormigón de cemento Portland.	38
Tabla 2. Típicos puentes viga-cajón de grandes luces que han presentado problemas de deflexiones.	49

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Fichas Técnicas	98
Anexo 2. Estudio de deformaciones a largo plazo de puentes viga-cajón construidos por voladizos sucesivos en colombia.....	107

RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS PATOLOGÍAS, TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO, REPARACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PUENTES EN CONCRETO CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS PARA GRANDES LUCES EN COLOMBIA*

AUTOR: DANIELA PATRICIA TAVERA DIAZ**

PALABRAS CLAVE: PUENTES, CONCRETO, VIGA-CAJÓN, VOLADIZOS SUCESIVOS, PATOLOGÍAS, DEFLEXIONES EXCESIVAS.

DESCRIPCIÓN:

En Colombia en los últimos años se ha presentado un gran auge de los puentes viga-cajón construidos por el método de los voladizos sucesivos, debido al gran desarrollo en infraestructura vial y a la construcción de vías de mayor velocidad y capacidad que demanda el aumento de la cantidad y tamaño del tráfico en las carreteras del país. Este documento presenta el estado del arte sobre las patologías, técnicas de mantenimiento, reforzamiento, reparación y rehabilitación de dicha tipología con el fin de construir un primer esbozo de una propuesta de investigación cuyo objetivo final es establecer si los puentes colombianos pueden presentar los problemas de deflexiones excesivas a largo plazo que han sido objeto de preocupación en este tipo de estructuras de mayor antigüedad a nivel internacional, además, de proponer un primer manual adaptado a las características del país, que contenga los lineamientos para el correcto tratamiento que estas superestructuras requieren para mejorar su vida de servicio. Adicionalmente, se realizó la elaboración de un inventario de fichas técnicas de los puentes de la tipología en estudio más representativos del departamento de Santander; esto con el fin de mostrar la demanda que existe actualmente tanto en el país como en el departamento de dicho manual.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil PhD.

ABSTRACT

TITLE: RESEARCH PROPOSAL FOR THE STUDY OF PATHOLOGIES, REINFORCEMENT, REPAIR AND REHABILITATION TECHNIQUES OF CONCRETE BRIDGES BY THE CANTILEVER METHOD FOR LARGE SPANS IN COLOMBIA INVESTIGACIÓN *

AUTHOR: DANIELA PATRICIA TAVERA DIAZ**

KEYWORDS: CONCRETE, BOX GIRDER, BALANCED CANTILEVER METHOD, PATHOLOGIES, EXCESSIVE DEFLECTIONS

DESCRIPTION:

In Colombia, in recent years, there has been a huge increase in the use of box girder bridges constructed by the cantilever method, due to the massive road infrastructure development, to higher speed and capacity road construction that is demanded by the increase in traffic volume and size in the country. This document presents the state of art about pathologies, maintenance, reinforcement, repair, retrofit and rehabilitation techniques of the typology mentioned before; with the intention to create a research proposal which final goal is to establish what is the probability that Colombian bridges would suffer problems of long time excessive deflections that have been focus of international concern in older structures of this kind. In addition, as a final result of the research, to propose a first draft of a manual adapted to the country's own characteristics in which content will have the guidelines for correct treatment that these superstructures required in order to improve their service life. Additionally, an inventory of technical sheets of the most representative bridges that belong to the typology in study in Santander department was elaborated; this was made in order to show the demand that currently exists both in the country and in the department to institute the manual mentioned before.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil PhD.

INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que tienen como función “salvar” obstáculos impuestos por la naturaleza, como ríos, valles y lagos; y al mismo tiempo aquellos que han sido creados por el hombre o artificiales, como las carreteras. Existen varias formas para realizar la clasificación de un puente, ya sea por su funcionalidad o su tipo de superestructura, como por la geometría que presenta o el procedimiento constructivo. En este caso, se tratarán los puentes construidos por el método de los voladizos sucesivos cuyo tipo de superestructura será la viga-cajón. [1]

El buen comportamiento estructural (gran rigidez a flexión y torsión) de los puentes viga-cajón, las ventajas en su construcción, sus formas estéticas, el fácil mantenimiento y el bajo costo de los materiales, además de cubrir grandes luces, hacen de estos una de las tipologías más utilizadas en Colombia; incluso al poder ser apoyado en pilares únicos, esto facilita su construcción en zonas de aguas profundas o regiones montañosas de grandes alturas, lo cual se adecua muy bien a la topografía, relieve y necesidades del país. [2]

El proceso constructivo de esta tipología, una vez están terminados los cimientos y pilas, se realiza por medio de carros de avance; conformados por una estructura metálica que se desplaza mediante un sistema de gatos hidráulicos sobre el tablero del puente ya construido, dicha estructura está diseñada para soportar el peso de cada tramo de viga-cajón de sección variable llamada: dovela. Se utilizan dos carros de avance, uno en cada extremo de los voladizos para que el avance sea simétrico. [1]

Aunque todos los puentes construidos por este método siguen en general el mismo proceso, cada uno presenta características que lo hacen único y que obligan a realizar cuidadosas revisiones de deflexiones durante el avance de los voladizos para poder realizar cualquier tipo de correcciones

pertinentes. Las dovelas o secciones viga-cajón variables están conformadas por una placa superior; en la que se apoya el tablero, una placa inferior y las almas; que le dan continuidad a la sección y pueden ser tanto rectas como inclinadas, lo que le da cierta complejidad a su construcción. [1]

En Colombia, tradicionalmente el diseño de puentes se realizaba siguiendo las recomendaciones de la norma AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), pero actualmente existe la norma colombiana de diseño de puentes que regula el diseño y construcción de estas estructuras en el país. Este código fue creado por las diferentes necesidades propias del país, como: las condiciones de sismicidad, el aumento de vehículos pesados por las carreteras del país y la posible intervención de empresas extranjeras que necesitaban ser reguladas.

En el año 1996 el Instituto Nacional de Vías INVIAS implementó, con la supervisión del Directorado de Carreteras de Dinamarca, el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL, cuyo alcance, contenido y funciones están presentadas en nueve volúmenes, en la Ficha Técnica de información de SIPUCOL y otros documentos de soporte. Este sistema se encarga del inventario, monitoreo, mantenimiento y reparación de la red de puentes presentes en el país. [3]

El aumento del volumen y tamaño de los vehículos que transitan por los corredores viales ha causado que los puentes se vean superados o llevados a los límites para los que fueron originalmente diseñados. [4] El rápido deterioro de los puentes existentes se ha convertido en una preocupación tanto a nivel técnico como económico en todo el mundo, ya que la reparación de un puente es mucho más costosa que un mantenimiento constante y preventivo. [5]

Por esta razón, es importante realizar un monitoreo de los puentes existentes y crear estrategias para que los costos de estas operaciones disminuyan, permitiendo la reparación de las estructuras antes de que sea más económico construir un nuevo puente que la reparación del mismo y sobre todo para poder mantener la estructura en servicio, ya que estos grades puentes normalmente forman parte de corredores viales que son de gran importancia para el país y por lo tanto su continuo funcionamiento debe ser una prioridad para delimitar no solo el impacto económico sino también el impacto social que el cierre de estas superestructuras puede acarrear. [4] [5] [6] [7]

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 TIPOLOGÍAS DE PUENTES

Existen diversas formas de realizar la clasificación de los puentes, no solo se distinguen por su geometría y función, la forma en que reciben y transmiten las cargas todos los elementos es clave para clasificarlos en una tipología estructural, así como el proceso constructivo utilizado y el material principal. A la hora de elegir qué tipo de puente y que proceso constructivo se adecua más a cada proyecto se tienen en cuenta factores como el espacio disponible, la geografía del lugar, aspectos económicos, materiales, equipos y mano de obra disponibles. A continuación, se presenta una introducción de las tipologías más habituales según el tipo de superestructura: [8] [9]

1.1.1 Puente Arco

La principal característica estructural de los puentes arco es que la mayor parte de la estructura trabaja a compresión gracias a su geometría, lo cual permiten el uso de materiales que no resistan la tracción. Los primeros registros de estos puentes son en piedra y madera, pero con los avances en los materiales de construcción, por ejemplo, la aparición del concreto reforzado y el acero, las luces alcanzadas por esta tipología han aumentado. El tablero para la circulación del tráfico a lo largo del puente puede estar ubicado en la parte superior, inferior o intermedia. Los procesos constructivos utilizados en esta tipología son: voladizos sucesivos, construcción sobre formaleta, por auto-cimbra, abatimiento de los semi-arcos, construcción mediante cable colgado y traslación horizontal o vertical. Los puentes de concreto (figura 1) sobre el río de Oro de Girón en el departamento de Santander pertenecen a esta clasificación. [9]



Figura 1. Puentes en arco de concreto sobre el río de Oro, vía Girón-Bucaramanga, Santander, Colombia. [10]

1.1.2 Puentes viga

Como su nombre lo indica el elemento estructural principal de estos puentes son las vigas, que, apoyadas en dos o más puntos, soportan las cargas a las que son sometidas mediante su capacidad para resistir la flexión. La resistencia de las vigas viene determinada por su canto y el momento de inercia de la sección transversal, es decir, por su geometría y sección transversal (entre las cuales se encuentran la sección en I y la sección cajón ya sea constante o variable).

Es una de las tipologías de puentes más utilizadas a nivel mundial, aquí se ubican los puentes de losa maciza de concreto pretensado, losa aligerada, puentes viga-cajón, entre otros. Inicialmente el material utilizado para estos puentes era la madera, hoy en día el concreto armado y pre-esforzado son los utilizados en estas estructuras, permitiendo la realización de mega obras con una arquitectura y superestructura más complejas e interesantes. Los procesos constructivos normalmente utilizados son: construcción sobre formaleta in situ, formaleta auto portante, dovelas prefabricadas, voladizos sucesivos, puente empujado y puentes girados. [9]



Figura 2. Puente viga-cajón Guillermo Gómez Ortiz, vía Girón-Zapatoca, Departamento de Santander, Colombia. Tomado de: Vanguardia Liberal.

[11]

1.1.3 Puentes pórtico

Se caracteriza por ser una estructura intermedia entre el arco y la viga, combinando sus propiedades geométricas y estructurales. Sus elementos son solicitados a flexión y compresión y a su vez se produce un efecto pórtico a las reacciones horizontales generadas en los apoyos. Los procesos constructivos utilizados comúnmente son: Construcción in situ sobre formaleta, voladizos sucesivos atirantados, construcción mediante giro de la pila, construcción mixta sobre cimbra y voladizos sucesivos y construcción mediante tirantes y apoyos provisionales. [9]

1.1.4 Puentes colgantes

Son estructuras cuya característica representativa es el uso del cable, que es un elemento que trabaja únicamente a tracción, pero cuya resistencia se ha elevado aún más debido a los tratamientos actuales disponibles y la posibilidad de hacer cables de grandes diámetros al unir muchos hilos. La estructura de los puentes colgantes está formada por los cables principales que se encuentran fijos en los extremos con la forma de un arco invertido y tienen la flecha (distancia vertical desde los extremos hasta el punto más

bajo) suficiente para resistir las cargas a través de tracción pura. Al ser el cable altamente deformable, el tablero de los puentes colgantes debe tener gran rigidez a flexión lo que permite que las cargas se repartan en toda la longitud del cable por medio de los tirantes verticales llamados pendolones. [9]

Los puentes catenaria, puente auto-anclados y puentes colgantes de tablero inferior, superior o intermedio son algunos de los ejemplos de esta tipología. Las fases del proceso constructivo son: la construcción de las torres y contrapesos, montaje de los cables principales y montaje del tablero que generalmente se realiza por voladizos sucesivos. [9]



Figura 3. Puente de Occidente, Departamento de Antioquia, Colombia.

[12]

1.1.5 Puentes atirantados

Los elementos fundamentales son los cables rectos que sostienen el tablero y transmiten las cargas al ser anclados a las torres o pilas fijas, que son esbeltas y cuya altura oscila entre el 20% y 25% de la luz principal, proporcionando rigidez al tablero por medio de fuerzas verticales. El tablero sirve para contrarrestar y equilibrar las fuerzas horizontales que se producen por la inclinación de los tirantes. Se diferencian principalmente de los puentes colgantes por la disposición de los cables de la pila al tablero

directamente y no de pila a pila y con cables auxiliares verticales, también se observa tensión y compresión en los elementos de la estructura. [9]

Son puentes utilizados para grandes luces y son estéticamente muy apreciados. Los primeros puentes de esta tipología se desarrollaron en Alemania y el record de luz actual es de 1104 m, título que ostenta el Puente de la isla Russki en Rusia desde el 2012(figura 4). La construcción por voladizos sucesivos, construcción sobre apoyos adicionales, traslación del puente mediante movimientos horizontales, traslación longitudinal por el sistema de empuje, giro sobre rotulas situadas debajo de las torres y traslación universal son los procedimientos constructivos que se han utilizado en la realización de estas mega-estructuras. [9]



Figura 4. Puente atirantado de la isla Russki sobre el estrecho del Bósforo oriental, Rusia. [13]

Otras tipologías son los puentes flotantes, los puentes móviles, puentes transbordadores y los puentes extradosados, que son una tipología híbrida resultante de los puentes viga cajón por dovelas sucesivas y los puentes atirantados reuniendo características propias de ambas tipologías, su primera aparición fue en Japón en el año 1994 con el puente Odawara Blueway. [14]

El INVIAS realiza una clasificación de las tipologías presentes en el país según el material principal utilizado en la estructura, organizándolos en 5 grupos: Puentes en concreto reforzado, puentes de concreto pre-esforzado, puentes mixtos de acero-concreto, en acero y otros como los puentes en madera, piedra, concreto ciclópeo, etc. [8]

A su vez, cada grupo puede ser subdividido según el tipo de estructura utilizada:[8]

- Puentes en concreto reforzado: losa y vigas, losa maciza, cajón y otros.
- Puentes en concreto pre-esforzado: losa y vigas, viga-cajón, arcos, atirantados, extradados, otros.
- Puentes en acero: armaduras, vigas, arcos, provisionales, otros.
- Puentes acero-concreto, estructura transversal: armadura, losas-vigas, arco, cajón, otros.
- Puentes acero-concreto, estructura longitudinal: simplemente apoyado, viga continua, colgante, atirantado, cajón, viga Gerber, otros.

1.2 PUENTES VIGA-CAJÓN EN CONCRETO CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS

El primer puente en concreto reforzado de sección transversal viga-cajón fue el Puente del Resurgimiento en Italia, era un puente arco y su construcción que inicio en 1909 tuvo una duración de dos años. Con el desarrollo y mejora de la calidad del concreto y del acero y con un mejor entendimiento del comportamiento estructural de estos materiales los puentes en arco fueron cediendo importancia como sistema estructural a los puentes viga cargados a flexión. Luego con la aparición del concreto pre-esforzado que combinado con el desarrollo del proceso constructivo por medio de los voladizos sucesivos fue posible aumentar las luces de los puentes y mejorar su geometría y comportamiento estructural, ya que hasta el momento la fisuración del concreto y su deformación habían reducido los puentes rectos a cubrir solo pequeñas distancias. [15] [16]

El primer puente del que se tiene información construido por el método de los voladizos sucesivos fue en 1930 en Brasil, el puente de Santa Catalina sobre el río Pixie conto con una luz de 68 m y aunque el procedimiento no volvió a ser utilizado hasta los años 50, esta estructura fue el precedente a partir del cual se desarrolló esta técnica que ha sido todo un éxito para los puentes de grandes luces y se ha convertido en un procedimiento utilizado en gran parte de los países del mundo. El primer puente pretensado continuo de sección viga-cajón, puente Sclayn sobre el río Maas en Bélgica, fue construido en 1948 y conto con 2 vanos de 62.7 m de luz cada uno. El puente Balduinstein (figura 5), de 62 m de luz, sobre el río Lahn en Alemania fue el primer puente pretensado construido en voladizo sucesivo en 1950, su diseñador, el ingeniero U. Finsterwalder, rescato este procedimiento del puente del río Pixie veinte años después y lo implemento al material para el que es ideal, el hormigón pretensado. El carro de avance, tal y como se conoce hoy en día y el atirantamiento provisional forman parte de los aportes de Finsterwalder que en la actualidad son utilizados en este proceso. [1] [15] [16]



Figura 5. Puente de Balduistein, primer puente construido en el mundo por el procedimiento de avance en voladizo sucesivo realizado in situ. [16]

1.2.1 Sección viga-cajón

La sección transversal viga-cajón es una evolución de los puentes de viga-T, al observar que el aumento requerido estructuralmente en la zona de compresión de la sección de las vigas sobre las pilas centrales era tan ventajoso para la capacidad de carga, dicha característica se implementó

a lo largo de toda la longitud. Aunque al inicio el voladizo de las dovelas era muy pequeño, su longitud ha incrementado con el desarrollo del preesforzado. Los grandes costos y mayores cargas en construcción causados por las secciones con más de una celda han llevado a que hoy en día la sección tipo conste de una sola cavidad que es más eficiente constructivamente. [15]

La sección transversal viga-cajón (figura 6) está conformada por una losa inferior, una losa superior (losa en voladizo e intermedia) y las almas. La **losa superior** es la parte de la estructura sometida a compresión debido a la flexión generada a lo largo de la estructura, sobre ella se encuentra el tablero y es la encargada de transferir las cargas a las almas. Las **almas** son las encargadas de transmitir las cargas de cortante a los apoyos, pueden ser perpendiculares a las losas o inclinadas, las últimas presentan mayor complejidad para el encofrado. Por último, la **losa inferior**, al cerrar la sección, le da la rigidez a torsión necesaria y característica de la tipología, además de estar sometida a tensión durante la vida de servicio, durante el proceso constructivo es la encargada de soportar las pre-compresiones del pretensado. Las losas deben tener el espesor suficiente para almacenar los cables del sistema de pretensionamiento. [1] [15]

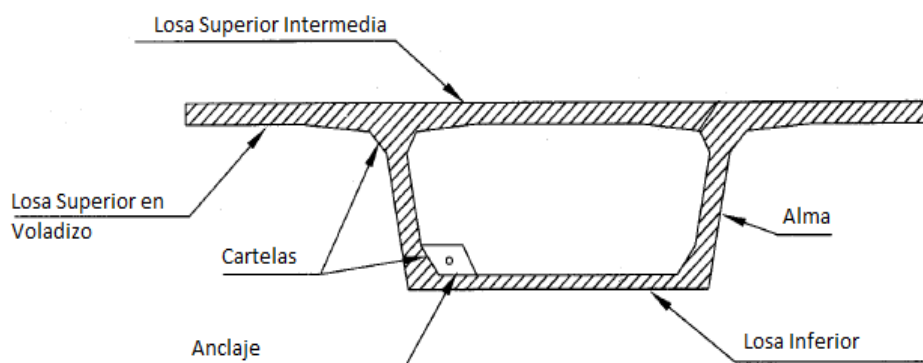


Figura 6. Sección transversal cajón y sus elementos. Adaptado de [17]

La viga puede ser de canto variable o constante, dependiendo del diseño y necesidades estructurales. La gran rigidez a torsión de este tipo de sección, la gran capacidad de las losas de absorber la carga lo cual permite una mayor esbeltez y por lo tanto mayor ligereza, sus formas estéticas y agradables han hecho de este tipo de secciones una de las más utilizadas a nivel mundial en la actualidad. Claro que también cuenta con desventajas, como una complejidad mayor en el proceso constructivo con respecto a otras secciones. [1]

1.2.2 Voladizos sucesivos: proceso constructivo

El método de los voladizos sucesivos se define como “la ejecución del tablero del puente avanzando por tramos sucesivos, haciendo soportar a la parte ya construida el peso del tramo en construcción”. Los tramos o dovelas se funden con su predecesor y al adquirir la resistencia suficiente se convierten en una estructura autoportante que sirve de soporte para la construcción de la siguiente etapa. El proceso constructivo debe tenerse en cuenta desde el diseño del puente, ya que las cargas y esfuerzos que se presentan durante el mismo deben ser tenidas en cuenta con la misma relevancia que las cargas generadas durante la vida de servicio de la estructura. [18]

A pesar de que el proceso constructivo no ha tenido mayores variaciones con el paso de los años, las teorías del diseño y pre dimensionamiento por otro lado si han tenido grandes cambios y avances, algunas son mencionadas a continuación: [18]

- Precast segmental box girder manual (1978)
- Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos. Mathivat. (1980)
- Sétra (2003)
- Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Manterola (2006)

- Criterios para la optimización del pre-dimensionamiento de puentes en sección cajón. Ariñez (2012)

El método de los voladizos sucesivos es un proceso por etapas, en cada una de las cuales se termina una dovela de manera equilibrada a cada lado de la pila. Las dovelas son las subdivisiones longitudinales del tablero del puente y su longitud oscila entre 3 m y 5 m normalmente. Estas etapas pueden dividirse en tres momentos (figura 7): Se inicia con las operaciones preliminares (dovela de pila o dovela 0 y montaje de los carros de avance), las operaciones básicas que incluyen la construcción de las dovelas en voladizos sucesivo: avance del carro, encofrado, hormigonado de la dovela, desencofrado, curado y por último las operaciones posteriores donde se construye la dovela de cierre y se realiza el desmontaje de los carros de avance. [1] [18]

Al terminar la pila, se inicia con la construcción de la dovela 0; primero se funde la losa inferior siguiendo con el alma y por último con el refuerzo y hormigonado de la losa superior. Esta dovela se puede asumir tanto empotrada en la pila como simplemente apoyada. Luego se procede por medio de los carros de avance a la construcción de las dovelas que conformaran el tablero del puente, a medida que este proceso avanza se va introduciendo los cables del sistema de pre-tensionamiento. [1] [18]

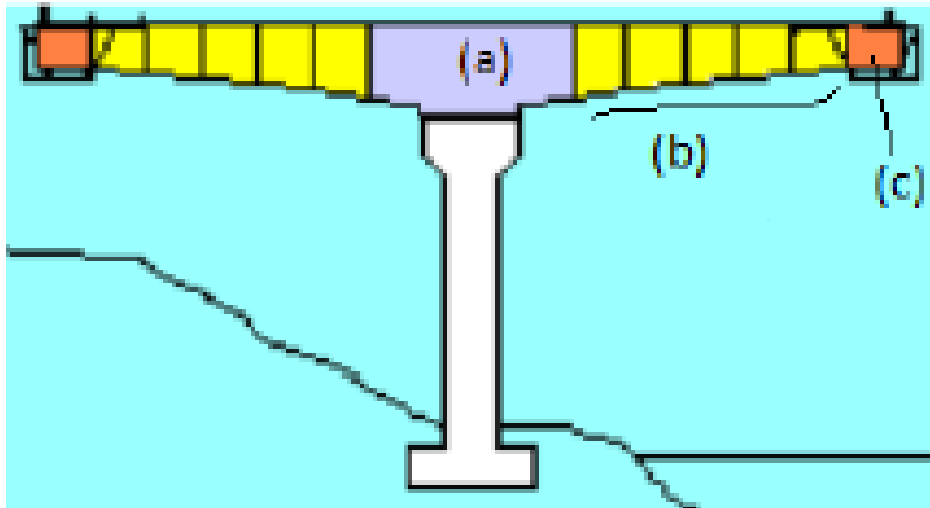


Figura 7. Vista de la sección longitudinal de un puente por etapas: (a) dovela inicial o 0, (b) dovelas finalizadas, (c) dovela en construcción.

Tomado de: SETRA. [19]

1.2.3 Carro de avance

El carro de avance es la zona de trabajo de los operarios, su función se basa en trasladar la formaleta y permitir la fundición de las dovelas. Un carro de avance está conformado por: las vigas metálicas principales que son los elementos portantes, vigas metálicas transversales proporcionan rigidez y capacidad portante, apoyos frontales que están conformados por las ruedas que permiten el desplazamiento y el gato sobre el que se apoya el carro durante la fundición, anclajes traseros que evitan el vuelco del carro, vigas de rodadura, vigas y elementos que soportan el encofrado, los pisos de trabajo para los operarios, elementos y plataformas auxiliares. [1] [18]

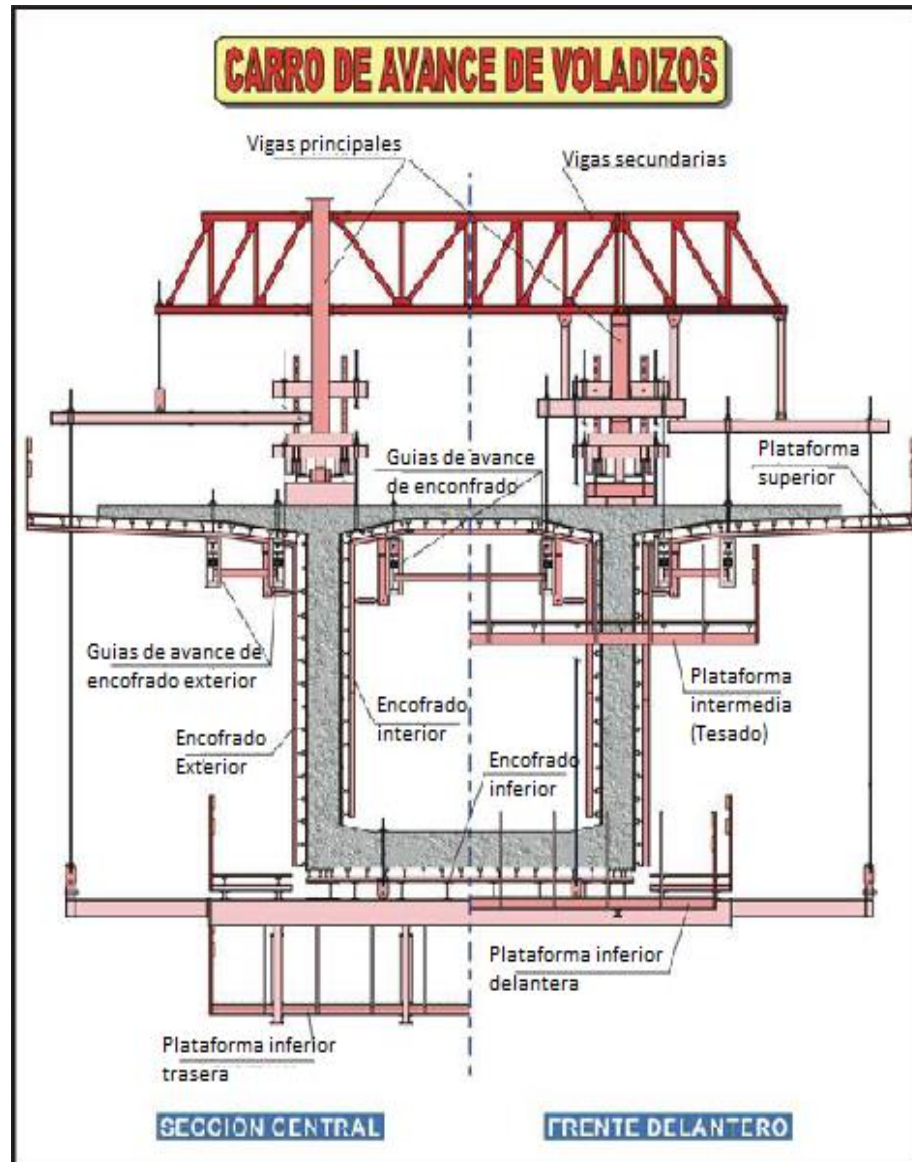


Figura 8. Sección transversal de un carro de avance de voladizos.

Adaptado de [1]

Es muy importante que tanto durante el avance del carro como durante el encofrado, vaciado y curado del concreto de las dovelas se realicen revisiones periódicas y constantes tanto que la capacidad de carga, como de los elementos que conforman el carro de avance y de la alineación, ya que corregir dichos problemas más adelante puede ser una tarea muy ardua. Si alguno de los elementos del carro de avance llegara a fallar puede traer consecuencias fatales al producirse incluso la caída del mismo. [18]



Figura 9. Carro de avance del puente Guillermo Gómez Ortiz. Tomado de: [20]

1.3 ANTECEDENTES EN COLOMBIA

El primer puente construido por el método de los voladizos sucesivos en Colombia fue en el año 1974 sobre el río Magdalena en Barranquilla, por un consorcio de firmas colombianas e italianas. El puente contaba con una luz principal de 140 m y dos luces laterales de 69,50 m. En la actualidad el puente recordó de luz de esta tipología en el país es el puente Guillermo Gaviria con 200 [m] de luz libre. [1]

La norma colombiana de diseño de puentes es la encargada de regular el diseño y construcción de estas estructuras en el país, pero su alcance no va más allá de que suceda con la estructura después de que finaliza el proceso constructivo. Al observar el crecimiento de los puentes en la infraestructura del país, en el año 1996 el Instituto Nacional de Infraestructura INVIAS implementó, con la supervisión del Directorado de

Carreteras de Cundinamarca, el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL. [3]

Dentro de los alcances del sistema se encuentra: [3] [8] [21]

- Predicción de las necesidades de mantenimiento y de los fondos requeridos.
- Elaboración de listados de puentes por prioridades de rehabilitación.
- Identificación de puentes con restricciones o limitaciones de servicio.
- Búsqueda de la mejor alternativa de rehabilitación.
- Cuantificación de los costos de inversión por puente.
- Determinación de la capacidad de carga de los puentes y sus restricciones.

El sistema consta de 11 manuales que describen las actividades relacionadas con los alcances del mismo, también cuenta con la Ficha Técnica de Información para el inventario de los puentes y los documentos de soporte necesarios para su correcta implementación. Los 11 manuales consisten en: [3] [8] [21]

- 1 -Generalidades.
- 2 - Inventario.
- 3 -Inspección Principal.
- 4 -Inspección Especial.
- 5 -Inspección Rutinaria, Mantenimiento Rutinario y Limpieza.
- 6 -Priorización de Obras de Reparación.
- 7 -Control de presupuesto, Costos y Avance de Obras.
- 8 -Diseño de Obras de Reparación y Refuerzo.
- 9 -Evaluación de Capacidad de Carga.
- 10- Carga Especial.
- 11- Sistema de Archivo.
- 12- Juntas Asfálticas.
- 13- Módulo de Fotografías, Guías.

SIPUCOL, a pesar de ser un sistema de monitoreo de la red de puentes que da una guía para su mantenimiento, inspección y priorización en las reparaciones, además de proveer un inventario a nivel nacional, tiene un enfoque hacia las patologías del pavimento y de los materiales del puente, permite conocer la capacidad de carga de los mismos, analizar los permisos para permitir o no el paso de cargas indivisibles extrapesadas y extradimensionadas y tomar dediciones de limitación de carga de servicio en caso de deterioro o desgaste, mas no abarca los efectos que dañan específicamente a la tipología que se va a tratar. [3] [8] [21]

Incluso con la existencia del SIPUCOL, en Colombia se debe tener un enfoque y control más específico hacia los puentes de concreto ya que solo estos representan el 87% del total de puentes en el país y de estos el 21% son en concreto presforzado, clasificación de incluye a los viga-cajón (Figura 1). [12] En esta línea de ideas, el objetivo final de la investigación, además de determinar las patologías y posibles tratamientos más adecuados a los puentes viga-cajón en Colombia, es construir una propuesta de manual propia del país donde se estipulen procedimientos claros de inspección, patologías y manifestaciones, técnicas y tratamientos para la reparación, incluso preventiva, de dicha tipología, tomando como base algunos documentos de este tipo que ya existen en otro paisas, como los catálogos producidos por el DTecITM (antiguo Sétra) en Francia. Varios de estos documentos están enfocados en el diseño, inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación de los puentes viga-cajón en concreto presforzado construidos por el método de los voladizos sucesivos, ya que esta tipología es la más extendida en Francia y el continente europeo. [22] [23]

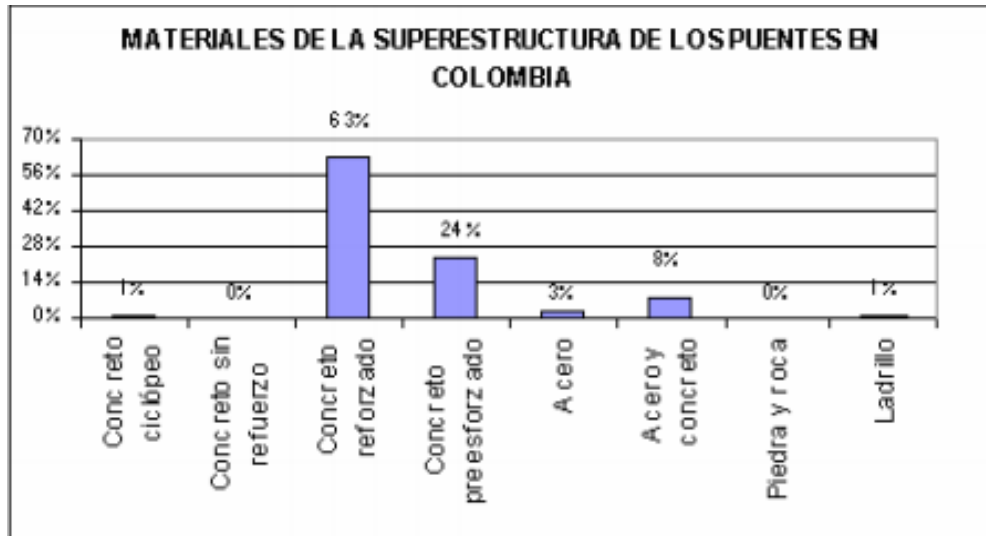


Figura 10. Distribución de los materiales principales de la superestructura.

Tomado de [24]

Teniendo en cuenta que los problemas y patologías, que afectan a los puentes viga-cajón en voladizos sucesivos, son propias de dicha tipología, se ve la necesidad de crear y adaptar un código para Colombia, que además de tener en cuenta las propiedades específicas y comportamiento estructural propios de estas estructuras, incluya las condiciones geográficas, sociales y técnicas del país. El código debe ser únicamente enfocado a identificar, prevenir y solucionar todas las patologías posibles que se presenten en los próximos años en todas las estructuras de este tipo que hay a lo largo del país, ya que al formar parte de las principales redes de comunicación y transporte su deterioro o eventual colapso representarían pérdidas enormes tanto económicas como sociales.

1.4 PATOLOGÍAS

“La patología estructural es el campo de la ingeniería que estudia el origen, formas manifiestas, consecuencias y mecanismos de ocurrencia de fallas y sistemas de daños en las estructuras, también trata las patologías en sí mismas, sus causas y su sistema de diagnóstico.” [25] Las causas de las patologías pueden ser clasificadas en intrínsecas y extrínsecas; todas

aquellas que residan en la estructura y tengan origen en los componentes y materiales de la misma son causas intrínsecas, son provocadas por errores humanos durante la ejecución, así como por la acción de agentes naturales (ataques químicos). Por otro lado, las causas extrínsecas son aquellas independientes de la estructura, son factores que la agreden “desde afuera hacia adentro” durante la concepción, ejecución o vida útil. [26]

Los puentes viga-cajón en Colombia construidos por el método de los voladizos sucesivos, como ya se mencionó anteriormente, han tenido un gran auge en los últimos años en el país y al ser estas estructuras relativamente nuevas no se ha prestado la atención suficiente a las distintas patologías que presenta esta tipología de puentes con el paso de los años y su uso continuo. Esta puede ser la causa de que en Colombia hoy en día no exista un manual o código que ayude y guíe a la identificación y solución de los problemas presentados por dicha tipología de puentes, sobre todo de aquellos fenómenos como las deformaciones excesivas causadas por efectos diferidos que al no ser tenidos en cuenta en el diseño pueden incluso dejar fuera de servicio a la superestructura. La necesidad de establecer un programa de mantenimiento para este tipo de puentes debe ser una prioridad ya que estas estructuras conectan las principales vías que articulan el país y si se permite su colapso, ya sea solo parcial, las pérdidas económicas pueden ser muy representativas, máxime considerando el gran número de estos que están siendo construidos dentro del programa de concesiones viales del país.

El deterioro en los puentes ocurre por una variedad de factores patológicos que se pueden originar por fenómenos como; cargas de tráfico inesperadas, aumento del volumen de tráfico, impacto de vehículos, condiciones del medio ambiente, movimientos de tierra, baja calidad de los materiales en construcción, efectos del cloro y carbonatación, falta de mantenimiento, deterioro del sistema de drenaje, baja calidad del

pavimento o por los efectos diferidos, que a pesar de ser tenidos en cuenta en el diseño siguen siendo la causa de grandes deformaciones tardías en la estructura. [5]

Existe una gran variedad de defectos que pueden presentarse en este tipo de puentes, tanto en la superestructura como en la infraestructura, para comenzar a presentar algunas de estas patologías se listan a continuación los defectos encontrados en un estudio realizado en un tramo de 1000 km (alrededor de 300 puentes) en el corredor vial del distrito occidental de Grecia: [27]

- Erosión y socavación tanto del lecho del río como de la fundación del puente.
- Agrietamiento y desintegración de la losa del tablero.
- Corrosión de las barras de refuerzo debido a la contaminación y carbonatación.
- Daños en las juntas de dilatación de la losa debido a tráfico pesado.
- Daño o desplazamiento y cambios de las condiciones de apoyo.
- Deterioro de la capa asfáltica (agrietamiento, distorsión de la superficie, desintegración)
- Daño de las barreras de protección debido a colisiones.
- Deterioro por humedad.
- Fallo del sistema de drenaje de la losa.

Todos los daños no estarán en el foco central de este documento, pero deben ser nombrados y tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio completo del estado del puente. [28] [29]

1.4.1 Patologías generales

Las estructuras de concreto presforzado en general pueden presentar múltiples patologías, a continuación, se presenta una recopilación de algunos de los problemas que se observan en este tipo de estructuras, que

abarca la tipología de los viga-cajón, pero no son específicas y únicas a este tipo de puente. Estas son las causadas por los materiales, uso, mantenimiento y otros aspectos que no son exclusivos a la tipología principal del documento, sin embargo, se enfocaran hacia su forma de manifestación en ella. [19]

En Colombia, en un estudio realizado en el año 2006 con el fin de conocer el estado actual de las obras de la red nacional de carreteras, realizado por la universidad Nacional en conjunto con el INVIAS, se establecieron 3 tipos de daños que se presentan en las estructuras de concreto: por diseño, por construcción y por uso y mantenimiento. [29]

Los daños por diseño se presentan por causas relacionadas con la etapa de concepción y diseño del proyecto, las causas más comunes de estos daños son: [29] [30]

- Cálculos insuficientes
- Estimación inadecuada de cargas y condiciones de servicio
- No considerar juntas de construcción
- Uso inadecuado de softwares
- Incorrecto dimensionamiento de los elementos
- Falta de especificaciones y características de los materiales a utilizar.
- Ausencia de detalles constructivos y estructurales
- Inadecuada disposición o insuficiencia del acero de refuerzo
- Uso de normas y especificaciones obsoletas
- Falta de comprensión sobre como la estructura se va a comportar

Por otro lado, los daños por construcción tienen un claro origen en las practicas inadecuadas durante el proceso de realización de la estructura, en la mala calidad tanto de materiales como de su uso, más específicamente en: [29] [30]

- Incorrecta interpretación de los planos

- Localización equivocada del refuerzo
- Deformaciones en la formaleta y falta de control sobre esta antes y durante el vaciado del concreto
- Desencofrado inadecuado o a destiempo
- Desplazamiento del acero de refuerzo durante el vaciado
- Prácticas deficientes en la colocación y compactación del concreto
- Concreto con dosificaciones incorrectas
- Ausencia o mal proceso del curado del concreto
- Mano de obra poco calificada
- Carga prematura de la estructura
- Falta de control en la calidad de los materiales utilizados

Por último, los daños durante el funcionamiento inician y ocurren durante toda la vida útil de la estructura, las causas tienen orígenes muy diversos: mecánicos, físicos, químicos o biológicos. En este punto se profundizará más al llegar a las patologías que son propias de la tipología de los viga-cajón, pero entre causas más generales que abarcan todas las estructuras de concreto se encuentran: [29]

- Por incremento de las cargas permitidas
- Eventos fortuitos: impactos, accidentes, explosiones, sismos, incendios y/o inundaciones.
- Cambios en las condiciones de exposición
- Uso y falta de mantenimiento, reparación y/o rehabilitación.

1.4.1.1 Fallas en los sistemas de drenaje

Las fallas en los sistemas de drenaje o la falta de los mismos en algunos elementos de los puentes llevan a patologías severas en varios componentes de la estructura como el deterioro de la superficie del concreto de los elementos estructurales y la corrosión del acero de refuerzo. Las patologías presentadas por los elementos no estructurales son en este caso secundarias ya que no afectan la seguridad estructural global de la estructura, pero no deben ser ignoradas por completo ya que

cuando el daño es muy significativo, por ejemplo, si las barreras vehiculares y peatonales presentan un agrietamiento muy severo pueden significar un peligro para los usuarios. [5]

En un estudio realizado en la universidad de Aveiro en Portugal se estudiaron 85 puentes, aquí se encontró que los mayores daños se presentan en el tablero (57%), las pilas (73%), juntas de expansión y apoyos, y en los sistemas de drenaje (71%). Las patologías presentes en el tablero y las pilas son principalmente desprendimiento del concreto con exposición del refuerzo y agrietamientos. [5]

La falta de sistemas de drenajes o su funcionamiento deficiente y en algunos casos un recubrimiento pobre produce una corrosión acelerada en el acero de refuerzo de los elementos estructurales, además de la corrosión del acero las manchas que puede presentar el concreto son un ejemplo claro y común de este tipo de daño. [6]

1.4.1.2 Materiales

Un factor determinante en las patologías de los puentes viga-cajón es aquellas que se presentan debido a la calidad y características del material, es decir, del hormigón armado y pretensado. El hormigón es un material que tiene una naturaleza inestable con el paso del tiempo, ya que puede presentar cambios químicos y físicos en sus características, esto se debe a las propiedades de sus componentes y las reacciones que presenta ante el ambiente en el que se encuentra la estructura. [26]

Cada componente del hormigón es propenso a presentar distintas patologías, el cemento por ejemplo puede tener problemas como el falso fraguado debido a la hidratación rápida del yeso, sufrir de retracción por exceso de calor de hidratación, también de retracción hidráulica, exceso de cal libre que es expansivo y lleva a fisuras en el hormigón, exceso de

magnesia y reacciones con los agregados que dan como resultados compuestos expansivos muy nocivos para la resistencia del material. [31]

Los agregados, por otro lado, no son susceptibles a presentar patologías con el tiempo, los problemas que pueden derivarse de estos compuestos vienen desde su elección y por lo tanto tener control sobre su calidad, composición química (evitar agregados que contengan azufre para que no reaccionen con el cemento de manera expansiva), tamaño y forma (agregados muy finos o muy alargados requieren mayor cantidad de agua en la mezcla y por lo tanto disminuyen su resistencia) es suficiente para evitar la mayoría de problemas. [31]

Los ambientes agresivos ricos en cloro a los que normalmente están sometidas estas estructuras por su ubicación geográfica [2], alta porosidad y capilaridad, falta de recubrimiento, deficiencia en los materiales de construcción y grietas severas son factores que afectan primordialmente la corrosión del acero de refuerzo. La carbonatación es otro factor determinante; es el proceso químico por el cual el CO₂ que existe en el aire penetra en los capilares del concreto y al ser combinado con el hidróxido de calcio se forma el carbonato de calcio, el cual es el culpable de que la alcalinidad del concreto se reduzca con el paso del tiempo. Los valores normales de alcalinidad (PH) del hormigón oscilan entre 13 y 12, cuando la carbonatación disminuye el PH de este a valores inferiores a 9,5 se mina la protección que este ofrece al acero del ambiente y de sustancias nocivas permitiendo así que el material se oxide. [26]

La velocidad de penetración (tabla 1) de la carbonatación depende directamente de la permeabilidad (que a su vez depende de la relación agua/cemento) y agrietamiento del material. [26]

La carbonatación es un proceso relativamente lento y afecta al acero en la medida en que aumenta la profundidad del concreto carbonatado, por esta

razón la longitud de recubrimiento es de suma importancia a la hora de la protección del acero. Es importante asegurarse de que la dosificación del concreto utilizado sea la correcta, se debe tener control sobre características como la porosidad, los espesores de recubrimiento y la exposición a medios agresivos.

Penetración en el tiempo, años /Penetration time in years						
Cubierta/Cover (mm)	5	10	15	20	25	30
Relación/Relation w/c						
0.45	19	75	>100	>100	>100	>100
0.50	6	25	56	99	>100	>100
0.55	3	12	27	49	76	>100
0.60	1.8	7	16	29	45	65
0.65	1.5	6	13	23	36	52
0.70	1.2	5	11	19	30	43

Tabla 1. Penetración del frente de carbonatación en el hormigón de cemento Portland. Tomado de [26]

Existen dos tipos de carbonatación; el proceso únicamente químico que es poco frecuente y el electroquímico que es el mecanismo habitual. En la carbonatación electroquímica son los iones de cloro, que se fijan en los poros del hormigón cuando este se moja, los que actúan como electrolitos y ayudan a que el oxígeno y la humedad penetre a través de los poros intercomunicados que siempre se encuentran en la superficie del concreto. [31]

La corrosión es la causa más frecuente del deterioro del acero y en la figura 11 se puede observar su tipología. El nivel de oxidación se puede clasificar en tres categorías:

- Superficial: la oxidación solo se presenta superficialmente, es decir, no hay reducciones en el área.
- Mediana: aparecen áreas muy afectadas por la corrosión lo que crea pequeñas capas.
- Severa: la corrosión es avanzada, hay penetración profunda en el acero y puede llevar a la perforación. [26]

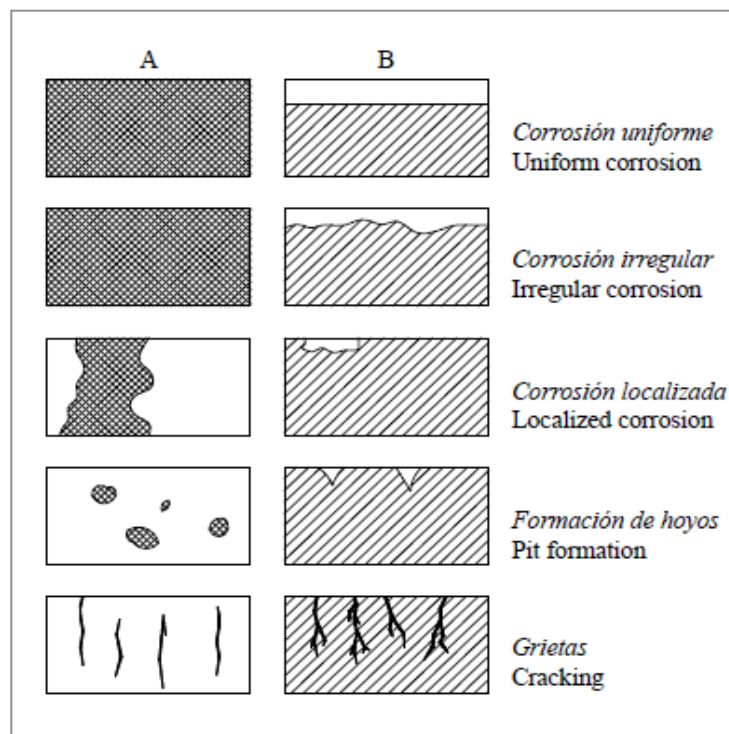


Figura 11. Tipología de la corrosión del acero. (A) Vista superior, (B) vista lateral. Tomado de [13]

1.4.2 Patologías y problemas propios de la tipología

1.4.2.1 Efectos diferidos en los elementos de concreto pretensado

Los desastres y pérdidas de servicio de las diferentes estructuras siempre han sido y serán una manera de progresar y acelerar la búsqueda de soluciones en la ingeniería estructural. Durante años el comportamiento y deflexiones a largo plazo de los puentes viga-cajón de grandes luces han

sido monitoreados, los pequeños valores de deflexión presentados durante los primeros años de servicio de la estructura hacen que los ingenieros realicen curvas de predicción totalmente optimistas y por lo tanto se sientan sorprendidos cuando las deflexiones se aceleran después de varios años. Al no tener conocimientos claro de que puede estar causando esa aceleración en la deformación de la estructura, las medidas correctivas aplicadas pueden ser incluso más perjudiciales ya que pueden aumentar los momentos flectores, sobrecargar el puente y posiblemente llevarlo al colapso con un alto nivel de daños. [32] [33]

En el caso del puente Koror-Babeldaob (figura 11.a), que cruza el canal Taegel en la Republica de Palaos y que en el momento de su finalización en 1977 fue, con 241 m de luz, récord de los puentes viga-cajón construidos por voladizos sucesivos. Fenómenos como los efectos diferidos; la retracción (Shrinkage) y el flujo plástico (creep), llevaron a este puente al colapso en 1996. A los 18 años de su construcción la deflexión del puente era de 1,61 m y siguió aumentando hasta el momento de su colapso en 1996 causado por un proceso de pretensado correctivo que se inició, pero luego se retrasó alrededor de tres meses. [32]

Cuando se quieren conocer las causas de las fracturas del concreto es importante centrarse en sus propiedades mecánicas cuando el material está sometido a tensión y aún más en aquellas que solo se manifiestan con el paso de largos periodos de tiempo. El estudio de dichos fenómenos viene desde inicios del siglo XX, cuando hombres como Freyssinet (1912) y Hatt (1907) descubrieron el flujo plástico (creep) del concreto. [33]

Los efectos diferidos son una de las principales desventajas del concreto ya que representan cambios volumétricos difíciles de predecir, además de que afectan la actuación del acero a lo largo del tiempo de servicio en la estructura. Estos efectos pueden subdividirse en una parte que es independiente de las cargas llamada *shrinkage* o retracción y en otra que

si depende de las cargas conocida como el *creep* o flujo plástico. El primero también se conoce como retracción de fragua y se define como la fluencia y retracción del concreto por el gradiente de humedad que se presenta entre el material y el medio donde este se encuentra, es decir, depende de la humedad del ambiente, la temperatura y el material. La retracción se puede dar incluso cuando la estructura no se encuentra sometido a ninguna carga y puede ser originada por causas físicas (temperatura) o químicas (efectos de hidratación). [33] [34] [35] [36]

Además, el *shrinkage* es un proceso que aumenta a medida que la estructura presente más grietas ya que estas la hacen más vulnerable y expuesta al agua, temperatura y al ambiente en general, por lo tanto, a mayor es el número de grietas más aumenta en el tiempo la retracción. Este fenómeno también se produce cuando el agua se desplaza por capilaridad hacia grietas creadas recientemente o por el consumo de agua de los agregados anhídridos. [33]

La retracción trae consecuencias severas en la estructura que idealmente deben ser controladas desde el diseño, estas son:

1. El agrietamiento de los elementos si el fenómeno de retracción se restringe.
2. Cambios en el volumen del concreto, lo cual genera movimientos en la estructura y por lo tanto afecta el valor de las deflexiones.
3. Pérdida de los esfuerzos iniciales de los elementos presforzados.

El flujo plástico (*creep*) es la deformación lenta y a lo largo del tiempo de un material generalmente sometido a una carga constante, el material presenta una deformación no lineal y varía con la composición y propiedades del concreto, es diferente de la deformación instantánea que ocurre al momento de que la estructura recibe la carga. Este fenómeno depende tanto de la retracción del concreto como la relajación y pérdida de

tensión del acero y entre sus consecuencias negativas para la estructura se encuentran: [34] [36] [37]

1. Aumento en las deflexiones en el tiempo; la estructura presenta mayores deflexiones de las que se proyectan en el diseño.
2. Redistribución de los esfuerzos internos de la estructura.
3. Aumento del esfuerzo a compresión en el acero.
4. Pérdida de los esfuerzos iniciales de los elementos presforzados.
5. Valores de acortamientos distintos en los elementos estructurales lo que genera esfuerzos adicionales que no han sido tenidos en cuenta y por lo tanto son perjudiciales para el correcto funcionamiento del puente.

Adicionalmente tanto el flujo plástico como la retracción causan pérdida de tensionamiento en los torones del sistema de pretensado del puente. El *creep* cuando la humedad y la temperatura son constantes es llamado *basic creep*. Cuando en el *creep* se tiene en cuenta tanto el *shrinkage*, que depende fuertemente de la geometría, humedad y temperatura, como el *basic creep* se conoce como efecto Pickett, *drying creep* o *flujo plástico de secado*. Este último está definido como el exceso de *creep* durante el secado sobre la suma del *shrinkage* y el *basic creep*. [34] [35] [38]

El esfuerzo total en las estructuras de concreto en cualquier momento de su vida es la combinación de sus esfuerzos elásticos iniciales, el *shrinkage* y el *creep*. En la figura 10, se observa el comportamiento de estos esfuerzos a lo largo del tiempo en estructuras bajo cargas de muy larga duración. El *drying creep* depende de la temperatura del ambiente y la humedad, mientras que el *basic creep* depende de las propiedades mecánicas y los componentes. Estos fenómenos son aún más relevantes en estructuras de concreto de gran escala, como es el caso de los puentes viga-cajón de grandes luces, los efectos diferidos en este caso toman mayor relevancia como causa de agrietamiento, deformación estructural, fuerzas de pre-esfuerzo y otros daños en la estructura. [36] [37]

El *creep* en el concreto se puede presentar tanto a tensión como a compresión, este último ha sido estudiado más ampliamente ya que los ensayos necesarios son sencillos de realizar y no presenta dificultades en la toma de datos debido al buen comportamiento estructural que presenta el concreto bajo esta condición, pero este tipo de flujo plástico a compresión está más relacionado a efectos en la edad temprana del hormigón. Por el otro lado, el *creep* en tensión presenta diversas dificultades ya que realizar ensayos de tracción al material arroja valores tan pequeños antes de fracturarse que la mayoría de dispositivos de medición no tienen capacidad de leer dichos resultados. [33]

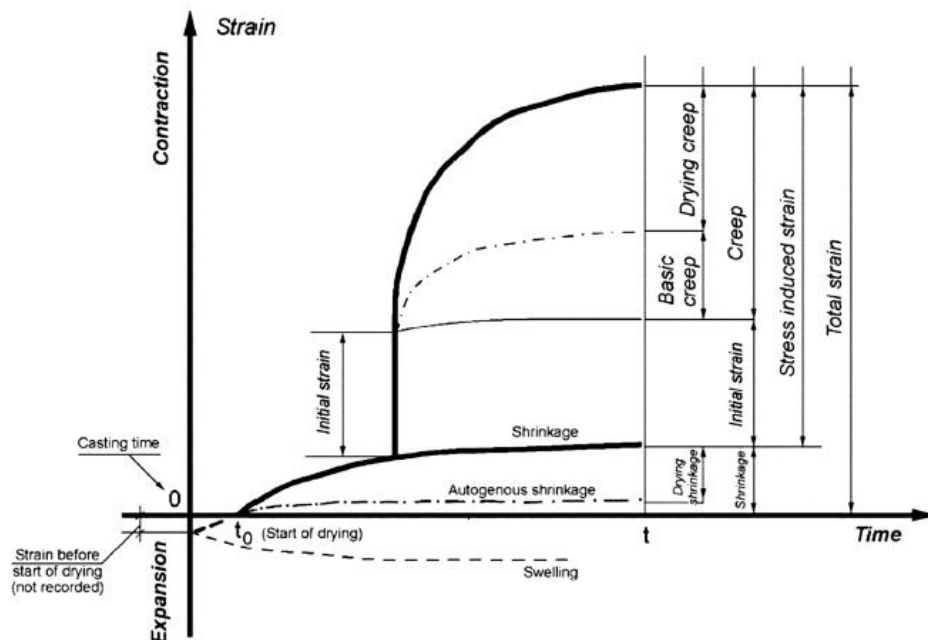


Figura 12. Componentes del esfuerzo del concreto bajo cargas de larga duración. Tomado de [37]

Uno de los efectos que se subestimó en el diseño y concepción del puente en Palaos fue el flujo plástico (*creep*). Solamente por efecto del *creep* y *shrinkage* durante la construcción del puente se presentó una deflexión adicional inicial de 22 cm, cuando la deflexión total en el puente estaba estimada para valores entre 71 a 76 cm. Estos efectos se observaron sobre todo durante la construcción de las dovelas, ya que al momento del cierre de los voladizos se contaba con una deflexión de 7,5 cm cuando se había

calculado que el camber o la contraflecha (deflexión inicial cóncava que se le da a este tipo de estructuras por la deformación que se dan después del desencofrado y se contrarresten los efectos de la carga) debía tener un valor de -30 cm. [32]

En 1996 se inició un proceso de pretensado correctivo, pero una demora de tres meses de la obra de rehabilitación causo finalmente el colapso total (figura 11.b) del puente el 26 de septiembre del mismo año, cuya consecuencia fueron dos muertes y muchos heridos además del cierre y perdida de servicio de la estructura.



Figura 13. (a) Puente de Koror-Babeldaob en Palaos en 1977; (b) Vista lateral del puente después de su colapso en 1996. [32]

Otro fenómeno que influyo en el aumento excesivo de las deflexiones en el caso del puente en Palaos fue la relajación del acero. Este fenómeno visco plástico se ve fuertemente afectado por las altas temperaturas; la republica de Palaos se ubica en el océano pacífico occidental y tiene un clima tropical con temperaturas medias anuales de 28° . El calentamiento de la losa superior producido por el sol tropical debió haber intensificado significativamente la relajación del acero y por lo tanto influido en las deflexiones excesivas presentadas. Por otro lado, factores como la humedad o los cambios de temperatura fuertes por estaciones no afectaron en gran medida el comportamiento del concreto en este caso por la ubicación del mismo, pero en lugares con estaciones los efectos de grandes cambios de temperatura deben ser tenidos en cuenta. [32]

Pero el calentamiento de la placa superior debido al sol no solo afecta al acero, la sección típica de los puentes viga-cajón consta de una placa superior de espesor constante (aproximadamente 200 mm) y una losa inferior cuyo espesor normalmente es variable (alrededor de 200 mm en el centro de luz y 1 m sobre las pilas). Para una losa de concreto la velocidad de secado, por lo tanto, también la velocidad de retracción y flujo plástico de secado, es aproximadamente inversamente proporcional al cuadrado de su grosor y las diferencias de temperatura y humedad que se presentan entre sus dos superficies es un factor importante. Este fenómeno ocasiona que el *creep* y *shrinkage* sean variables a medida que varía la sección transversal, incluso es diferente entre las dos losas al ser estas de espesores distintos, pero esto representa una mayor dificultad a la hora del cálculo y modelamiento de la deflexión de la estructura por lo cual normalmente se asume como constante causando errores notables. Según Bažant la causa principal de las deflexiones excesivas está en el gran diferencial entre los valores de retracción entre la losa superior e inferior causado por la diferencia de los espesores entre las losas. [39]

Una problemática más que se presentó fue la pérdida de tensionamiento de los cables del pretensado, en el caso específico del puente de Palaos, a los 19 años de servicio en el momento en que se iba a realizar la rehabilitación de los tendones la pérdida de pre tensionamiento era de un 50%, que comparada con el 22% que se calculó en el momento de la concepción de la estructura, por medio de las fórmulas de la teoría de la viga simplemente apoyada, es bastante mayor. Esta situación lleva a pensar que las teorías de diseño subestiman peligrosamente las deformaciones en el tiempo y por lo tanto la búsqueda e implementación de nuevos modelos es indispensable. En un análisis realizado por Kristek y Bažant se llegó a la conclusión que, al utilizar la teoría clásica para la flexión de las vigas, las deflexiones tardías se subestiman alrededor de un 20%. [2] [32]

En conclusión las principales causas de la subestimación de los efectos diferidos en este caso fueron: material pobre para el modelamiento del flujo plástico y la retracción, idealización de la estructura como viga simplemente apoyada en lugar de realizar un análisis 3D completo, diferencia en los valores de retracción y flujo plástico por el espesor variable de las losas de la sección transversal de las dovelas y, por último, la falta de una estimación estadística que mostrara las diferentes respuestas que podía presentar la estructura a través de los años. [32] [40] [41] [42]

Otra causa de las pérdidas de pre tensionamiento en los puentes de esta tipología es que la carga muerta comparada con la carga total es bastante considerable, a su vez, las propiedades reológicas del concreto y la relajación del acero de pretensado impactan en las deformaciones y en las pérdidas de tensionamiento. Existe registro de un gran número de estas estructuras que por causa de las deformaciones excesivas han tenido que cerrar o han sido reparadas antes de que la vida de servicio inicialmente asumida hubiera terminado, trayendo consecuencias que afectan severamente las comunidades que son usuarios y dependen en cualquier nivel del puente. [40]

Las consecuencias de permitir una deformación excesiva en la estructura van más allá, la redistribución de esfuerzos (un producto no deseado de las deformaciones inesperadas) puede desencadenar agrietamientos en el hormigón de los elementos estructurales acelerando procesos de corrosión en el acero de refuerzo y de pre-tensionamiento disminuyendo la seguridad del puente. Además, la redistribución de esfuerzos y el agrietamiento del hormigón reducirán aún más la resistencia de la estructura a las deflexiones excesivas convirtiéndose en un proceso cíclico y peligroso, lo cual hace vital que se inviertan grandes esfuerzos para mejorar la exactitud de las predicciones de las deformaciones tardías; el nivel de complejidad del análisis de las deflexiones aumenta aún más ya que los efectos diferidos: el flujo plástico, la retracción y la relajación de los esfuerzos influyen uno

en el otro constantemente por lo tanto se debe realizar un análisis que los incluya en toda su magnitud. [2]

Otro factor que contribuye a la subestimación de este importante fenómeno es la pobre y poco realista estimación del valor de la asíntota que el *static creep* del concreto alcanza con el tiempo. [41]

Entender las razones de estas deformaciones excesivas es muy importante, ya que han sido causa de problemas en estructuras de este tipo alrededor de todo el mundo, algunas de estas estructuras no han manifestado grandes deformaciones sino hasta después de 30 años de servicio; el puente Urado en Japón es un ejemplo de esto y en la tabla 3 se presentan otros más. Además, al estudiar las distintas estructuras se puede por fin llegar a un modelo que realmente prediga el comportamiento de dichos puentes para poder establecerlo como una guía estándar, que represente una mayor seguridad y eficiencia, ya que los utilizados hasta ahora como el método de los elementos finitos, aunque incluyen los efectos diferidos, no son totalmente acertados en la predicción de sus implicaciones totales y realizan predicciones insatisfactorias que subestiman estos fenómenos dando como resultado predicciones poco realistas. [32]

Algunas soluciones propuestas por Bažant (2012) en el diseño para minimizar las grandes deflexiones en el tiempo, que aunque son bien conocidas la mayoría de veces son ignoradas, son: evitar una articulación en el centro de luz, elegir un concreto con un bajo flujo plástico (creep) en el tiempo, dar al concreto más tiempo para ganar resistencia antes de aplicar el pres-fuerzo, incrementar el nivel de pretensado preferiblemente al punto de que la deflexión sea hacia arriba inicialmente, utilizar vigas más rígidas (con mayor altura) e instalar ductos vacíos para posibilitar la instalación de cables de pretensado adicionales si fuera necesario. Aunque el conocimiento de estas precauciones está bastante extendido, en la

mayoría de casos son ignoradas, ya sea por falta de recursos o de conciencia. [40]

Otra de las razones por las cuales el estudio y predicción de la acción de los efectos diferidos y de la relajación del acero es tan complejo y difícil de predecir y modelar, es que tanto el flujo plástico como la retracción pueden ser variables tanto en el tiempo como a lo largo de la geometría de toda la estructura; es decir, al variar las propiedades del material en cada etapa de la construcción, la distribución de esfuerzos a lo largo de la estructura se ve afectada de manera variable. [40] Además, el hecho de que las vigas tengan una sección transversal cerrada causa que factores como el shear lag effect, la torsión y la deformación distorsionada de la sección influyan a la hora de predecir el comportamiento a largo plazo de la estructura lo que deriva en un análisis más complejo que, por ejemplo, el utilizado para vigas rectangulares. [2]

Las deformaciones excesivas en los puentes no solo causan problemas estructurales también estéticos, ya que, aunque puede que el puente no colapse, una gran deflexión produce falta de confianza en los usuarios y por lo tanto no trasmite seguridad ni comodidad a la comunidad que dependa de su funcionamiento, lo cual es otra razón para garantizar que las deflexiones se limiten a las calculadas en el diseño. Daños en el pavimento y en los sistemas de drenajes también pueden ser el resultado de las deflexiones excesivas. [41] [43]

Típicos puentes viga-cajón de grandes luces que han presentado problemas de deflexiones					
Name	Longitud de los vanos [m]	País	Tipo	Deflexión	Años que tardo en manifestar problemas
Sanmen Gorge Yellow River Bridge	105 x 4 x 160 + 105	China	Marco rígido continuo	22 [cm]	10
Jiangjin Yangtze River Bridge	140 + 240 + 140	China	Marco rígido continuo	31.7 [cm]	-
Huangshi Yangtze River Bridge	162 + 3 x 245 + 162	China	Marco rígido continuo	30.5 [cm]	7
Humen Auxiliary Shipping Channel Bridge	150 + 270 + 150	China	Marco rígido continuo	26 [cm]	7
Parrotts Ferry Bridge	99 + 195 + 99	USA	Marco rígido continuo	63.5 [cm]	12
Koror-Babeldaob Bridge	72 + 241 + 72	Palua	Marco en T con una rotula	139 [cm]	18
Stovset Bridge	100 + 220 + 100	Noruega	Marco rígido continuo	20 [cm]	8
Stolman Bridge	94 + 301 + 72	Noruega	Marco rígido continuo	9.2 [cm]	3

Tabla 2. Típicos puentes viga-cajón de grandes luces que han presentado problemas de deflexiones. Adaptado de [43]

En las principales carreteras de Colombia existe un gran flujo de tráfico pesado, camiones de más de 10 toneladas. Dicha característica del país sumada al hecho de que la tendencia hoy en día es el diseño de grandes puentes con vidas de servicio más largas (hasta 100 años), crea la necesidad de no ignorar el efecto que el tráfico pesado tiene en el flujo estático cíclico del concreto. El efecto de un porcentaje de camiones pesados conduciendo en paralelo de manera repetitiva a lo largo de los años no debe ser subestimado a la hora de predecir el desarrollo de las deflexiones tardías y la redistribución de esfuerzos en la estructura. [41]

Como ya se mencionó anteriormente el uso de modelos simplificados en extremo y de fórmulas primitivas para el cálculo de los efectos diferidos en la estructura son otra gran fuente de inexactitud, por esta razón nuevos modelos más complejos, pero más cercanos a la realidad se han desarrollado recientemente; basados en estudios estadísticos hechos a largo plazo del *creep* y la retracción. Ejemplos de estos nuevos modelos son el modelo B3/B4 y el Model Code 10, que ya han sido probados para el cálculo de deflexiones dependientes del tiempo y sus resultados han sido más próximos a la realidad. Una característica común

de estos nuevos modelos es que el *static creep* no se detiene con el tiempo bajo la acción de un esfuerzo constante, sino que en su lugar asumen que el crecimiento de este continúa, siguiendo una pendiente asintótica no nula en la escala a largo plazo. [41]

El desarrollo de modelos en tres dimensiones es, para el análisis del flujo plástico, de suprema importancia ya que este tipo de modelamiento permite el ensamble del comportamiento de la estructura bajo el flujo plástico dependiente del tiempo con otros procesos presentes en la estructura que pueden ser independientes de este (por ejemplo: el agrietamiento, el ablandamiento (softening) y la fluencia plástica (cyclic creep) del concreto). Por desgracia la atención sobre la interacción de estos fenómenos es muy limitada actualmente y sus efectos en las deflexiones tardías y son ignorados ya que el foco se ha centrado únicamente en el comportamiento visco elástico desencadenado por el *static creep* del concreto. [41]

Sumado a lo anterior, los modelos que se han desarrollado a lo largo de los años para el modelamiento del flujo plástico y de la retracción son en su gran mayoría para concretos normales, pero actualmente los puentes de grandes luces son construidos con concretos de altas resistencias (proporcionando mayor durabilidad y resistencia a las estructuras) para los cuales es necesario ajustar y evaluar que tanto se ajustan los modelos existentes al comportamiento de estos concretos. Adicionalmente, la mayoría de estos modelos tampoco tienen en cuenta la influencia de los distintos rangos de acero presente en la estructura y se ha demostrado que este es un factor que también puede influir en los efectos diferidos en el tiempo, una mayor cantidad de refuerzo en el centro de luz y sobre las pilas puede ayudar a disminuir los efectos y por la tanto las deformaciones. [43]

A pesar de que los efectos diferidos y la relajación del acero son causas principales de las deformaciones tardías, también otra serie de aspectos son influyentes. Las variaciones de rigidez a lo largo de la estructura debido al

agrietamiento, la redistribución de momentos que se origina, las propiedades mecánicas variables en toda la estructura, la pérdida de adherencia entre el acero de tensionamiento y el hormigón y los efectos del deterioro son algunos de estos aspectos. [40]

1.4.2.2 Problemas en las juntas

En Europa en los años sesenta y setenta se produjo un auge en la construcción de puentes, por lo tanto la mayoría de estas estructuras existentes hoy en día tienen alrededor de 50 años, la durabilidad y sobrecarga de estos puentes es un factor de preocupación pero también lo es la fatiga que pueden presentar las uniones entre las dovelas de hormigón armado, no porque las cargas vivas sean lo suficientemente dañinas sino por el nivel pobre de detalle que se realizó de las juntas durante su diseño y construcción que combinado con la corrosión, el cambio de las propiedades del material con el tiempo, el desconocimiento del nivel de agrietamiento y la reducción de los niveles de tensionamiento en las barras de acero puede ser un factor determinante; el refuerzo utilizado en las juntas de las vigas cajón es susceptible a fatiga causada por eventos extremos más que por el uso cotidiano. [44]

En los puentes construidos en esta época era común utilizar anclajes muertos ya que facilitaban en proceso constructivo, con el tiempo diferentes estudios y la experiencia han demostrado que este tipo de junta es muy susceptible a la fatiga sobre todo al ser sumado con efectos como el “creep” o flujo plástico y el “shrinkage” o retracción, tan comunes en esta tipología de puentes. [44]

Los problemas no solo se presentan en las juntas entre dovelas sino también en las juntas horizontales entre la viga y la losa. Al ser fundidas estas dos partes de la estructura por separado se crea una junta fría entre ellas que bajo ciertas circunstancias puede causar agrietamientos y deslizamientos visibles con movimiento excesivo llevando a la fractura del acero de refuerzo y estribos que atraviesan la junta, pérdida del trabajo compuesto de la losa y la viga y grietas por cortante en las almas de la sección. Las causas de falla de la junta son: [45]

- Rugosidad y limpieza inadecuadas al momento de la construcción
- Insuficiente acero de refuerzo en la junta
- Falta de longitud de anclaje del refuerzo que atraviesa la junta, carga cíclica producida por gran volumen de tráfico pesado aplicada en la estructura durante un largo tiempo.
- Carga desequilibrada de las ruedas causando momentos transversales en las juntas.

Los efectos producidos por grandes cargas cíclicas no son tenidos en cuenta a la hora del diseño y por lo tanto esto propicia la aparición de este tipo de falla de las juntas. [45]

En las juntas de expansión también se han observado desgastes severos causados por infiltraciones y un inadecuado diseño estructural de las mismas para soportar las deformaciones y sollicitaciones, como los impactos o los probables desniveles. El concreto presente en esta zona también se puede ver afectado por desprendimientos debido al impacto de los elementos de la junta. En las inspecciones realizadas en el país por el INVIAS los años 1997 y 2001 se observó que la losa, vigas y apoyo de los puentes también se han visto afectados por los problemas en las juntas, de hecho, se registró que los daños en las juntas de expansión aumentaron de un 14% a un 21% de una inspección a la otra. [8]



Figura 14. Daño en junta entre losa de aproximación y tablero. Puente el Tapón. Tomado de [8]

1.4.2.3 Problemas en las zonas de anclaje y los cables de pre-esfuerzo

Los anclajes de los puentes presforzados son peculiares especialmente aquellos que son intermedios, es decir, que se encuentran entre la unión de dos dovelas continuas. Estos anclajes se ubican en los *bloques de anclaje* (blisters, figura 15) lo que obliga a que la fuerza debe ser transferida del “blíster” a la losa superior y a las almas de la viga. [46]

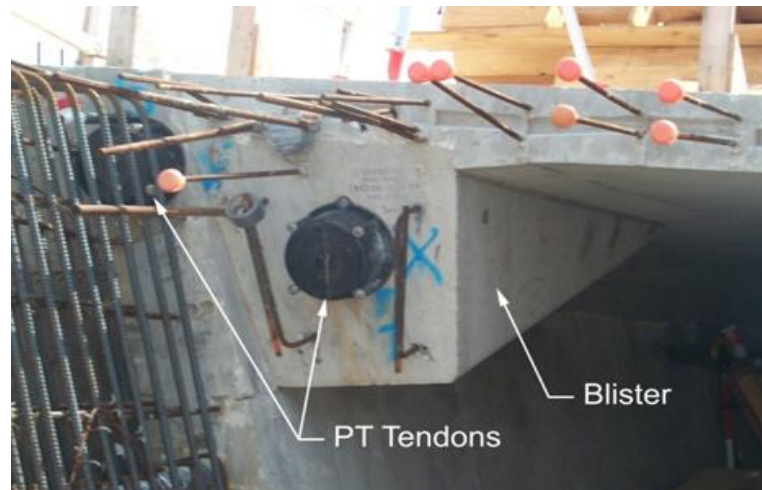


Figura 15. Detalle de un “Blíster”, tomado de [47]

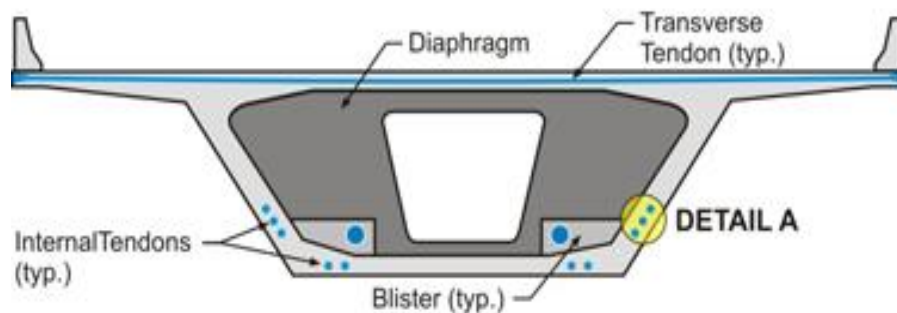


Figura 16. Sección transversal típica de una dovela de un puente viga-cajón.

[47]

La alta densidad de acero de refuerzo presente en los alrededores de los anclajes es la razón más común de los problemas con el concreto fundido in situ, ya que esto resulta en zonas con baja capacidad del concreto llevando a este a mostrar fallas de aplastamiento debajo de los anclajes. [46]

No solo el acero de refuerzo es susceptible a presentar daños, factores como el cloro y la humedad propician la aparición de daños y vacíos en el sistema de

torones en los puentes pre-esforzados, esto contribuye a acelerar el proceso de corrosión de los cables, disminuyendo así su resistencia y en consecuencia perjudicando la seguridad en general de la estructura. En algunos casos, si el daño en los cables es muy severo, esto puede llevar a la falla total de los mismos y por lo tanto al colapso de la estructura. [48]



Figura 17. Ducto de un cable de presfuerzo expuesto en la losa inferior.
Tomado de [49]

El primer pre-esforzado puente viga-cajón construido en Portugal (figura 18) a finales de la década de los 70 por el método de los voladizos sucesivos, cuya sección transversal consta de dos celdas, presento varios problemas con el paso del tiempo y del uso. Entre las patologías encontradas durante las inspecciones realizadas fue la corrosión tanto de los cables o tendones de pre-esfuerzo como de los ductos que los contenían, además, de la corrosión en el acero de refuerzo causada por la pérdida de recubrimiento. El origen de la corrosión de los elementos del pre-esfuerzo fue en un descuido al final del proceso constructivo; los orificios en las dovelas que se utilizaron para la instalación de los carros de avance no fueron propiamente rellenados con concreto, lo cual dejó los ductos del pre-esforzado entre dovelas altamente expuestos al ambiente y por lo tanto susceptibles a la corrosión. [49]



Figura 18. Vista del puente N. S. Guía y su sección transversal de doble celda.
Tomado de [49]

A finales de la década de los 90 e inicios del siglo XXI, otros casos de puentes viga-cajón en concreto donde se observó la corrosión de los cables del pre-esfuerzo fueron algunos puentes en las regiones de Florida y Tampa en los Estados Unidos; el puente Niles Channel, el Sunshine Skyway y el puente Mid-Bay. Los tendones del pre-esfuerzo de estas estructuras presentaban altos grados de corrosión cerca de los bloques de anclaje además de corrosión y falla de varios cables a lo largo de todas las estructuras. Aunque una de las razones principales se atribuyó como en el caso de Portugal a la acumulación de agua en lugares donde la lechada dejó vacíos, a su vez se encontró que varios de los ductos de polietileno, que son aquellos encargados de contener los cables, presentaban múltiples fracturas y por lo tanto pudieron contribuir a la aceleración del proceso de corrosión. Las grietas en los ductos pueden ser causadas por tres factores; propiedades inferiores del material, respuesta inadecuada de los ductos a los factores ambientales especialmente a variaciones de temperatura y la manera en que el ducto interactúa con la lechada que se utiliza para su relleno. [50]

A pesar de que los ductos no tienen una función estructural en los puentes y por lo tanto no afectan directamente al comportamiento de la estructura y no se ha registrado aun ningún colapso causado específicamente por este fenómeno, su agrietamiento y ruptura tiende a exponer más al ambiente a los cables

acelerando el proceso de corrosión con los años y en conclusión comprometiendo la integridad y seguridad del puente, ya que los cables si son una parte fundamental del funcionamiento estructural. [50]

La corrosión de los cables no es la única preocupación respecto a la estructura del pre-esforzado, también se debe prestar especial atención a las zonas de los anclajes. Problemas que se manifiestan en deformaciones importantes de las placas de los anclajes o fisuras y desprendimientos del concreto en esta área pueden ser causados por diferentes descuidos ya sea en el diseño o durante el proceso constructivo. Las causas de estas patologías pueden ir desde problemas a la hora del desencofrado del concreto, defectos locales de relleno, hasta en el diseño de anclajes simples que no son adecuados para este tipo de superestructuras, también puede atribuirse a dificultades durante el proceso, por ejemplo, las grandes cantidades de refuerzo que existe normalmente alrededor de los anclajes puede dificultar su correcta implementación y por lo tanto desencadenar un mal funcionamiento en el tiempo de servicio del puente.[51]

En algunos casos los problemas son causado por el desplazamiento del centro de gravedad del pretensado respecto al de la sección, esta inconsistencia puede causar deformaciones en la sección transversal y en el perfil longitudinal del puente. [17]

1.4.2.4 Problemas durante el proceso constructivo

Cuando se toma la decisión de utilizar el método de los voladizos sucesivos como proceso constructivo, las cargas tenidas en cuenta para el diseño de la estructura no son solo aquellas a las que se verá sometida durante su vida de servicio, sino que a su vez las que se presentan durante su construcción toman gran relevancia ya que el puente trabaja y presenta un comportamiento estructural distinto durante las etapas previas al cierre de los voladizos. Durante la etapa de diseño de estas estructuras se tienen en cuenta múltiples situaciones que pueden ser perjudiciales durante el proceso constructivo, distintos estados límites a los que puede llegar a ser sometida la estructura en los momentos más

críticos de su construcción. La caída del carro de avance o el volcamiento de los voladizos, son dos de las hipótesis críticas que pueden llegar a regir en el diseño de la misma.

Pero también se pueden presentar situación que no están previstas en el diseño, en China por ejemplo se han registrado varios casos de ruptura de los cables de pre-esfuerzo de la losa inferior durante el proceso constructivo en la primera década del siglo XIX. Como caso concreto, se tiene un accidente ocurrido durante la construcción de un puente viga-cajón en concreto presforzado de marco rígido con tres luces de 47 + 75 + 47 m, como se muestra en la figura 19. [52]

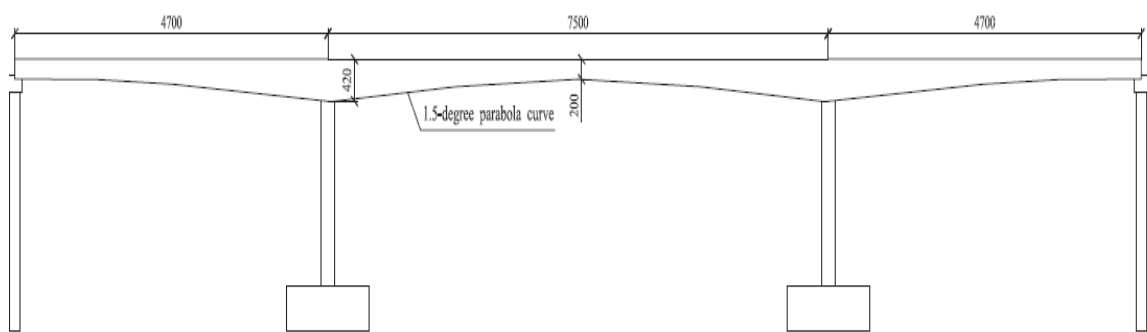


Figura 19. Vista longitudinal del puente. [52]

El accidente ocurrió justo cuando el contratista tensiono los cables de la losa inferior después de que la dovela de cierre fuera fundida en el centro de luz. Algunas grietas longitudinales aparecieron en la losa luego de haber realizado el tensionamiento del cable 11, pero no fue hasta 10 horas después de concluido el proceso que la aparición de grietas muy anchas, quiebres en el concreto y ruidos de la estructura provenientes de la losa alertaron sobre el estado del puente. Más tarde, la inspección arrojó que las grietas habían aparecido en un rango de 20 metros alrededor del centro de luz, que tanto el alma como la losa inferior presentaban grietas y daños severos, en las dovelas más cercanas al centro de luz la losa inferior fallo completamente, y que uno de los cables del presfuerzo de la losa incluso se había roto. En la figura 20 se puede observar la falla de la zona de los ductos de los cables del pretensado. [52]



Figura 20. Agrietamiento del concreto y falla y separación transversal de los ductos de los cables de pretensado en la losa inferior. [52]

Un estudio realizado que analizo el proceso de falla del puente concluyo que todo inicio durante el proceso de pretensado de los cables de la última dovela con el agrietamiento del concreto alrededor de los ductos, el estudio concluyo que las principales causas de falla fueron el sobredimensionamiento de los tendones longitudinales del pretensado y el tamaño de la losa inferior. En el caso del sobredimensionamiento de los tendones, esto se debe a que en los puentes de esta tipología es muy común los agrietamientos y las grandes deflexiones en las vigas y para contrarrestar esto los diseñadores aumentan el número, tamaño y tensión aplicada a los tendones, algunas veces, como en este caso de manera excesiva perjudicando a la estructura. En el caso del dimensionamiento del tamaño de la losa inferior y de los ductos, la relación del espesor de la losa y el diámetro de los ductos no debía ser mayor a 30 y en este caso el valor era de 32, por lo tanto, no cumplía con los requerimientos del código de diseño del país. [52]

Entre las causas de falla también se encontró que la ubicación del refuerzo en la última dovela fue incorrecta, los estribos que debían conectar el refuerzo superior e inferior de la losa inferior no fueron ubicados de manera que los esfuerzos pudieran transferirse (figura 21), a pesar de no ser esta la causa principal de falla

si fue un factor determinante una vez iniciado el agrietamiento ya que el sistema no tuvo la capacidad de resistir y trasferir los esfuerzos necesarios. [52]



Figura 21. Ubicación del refuerzo de la losa inferior de la dovela de cierre del puente. [52]

Ejemplos de puentes que tuvieron problemas durante el proceso constructivo fueron el Viaducto Viosne (Francia) en el año 1970, cuya primera dovela en voladizo se inclinó considerablemente, el puente Calix (Francia) en 1975: que sufrió el colapso de una dovela prefabricada y el puente Bellegarde (Francia) en 1982, que sufrió la caída del carro de avance en el cual se apoyaba la formaleta de la dovela a fundir. [19]

Otro problema clásico de esta tipología hacia el final de la etapa constructiva es la deflexión excesiva de los voladizos cuando están cerca de la construcción de la dovela de unión. [19]



Figura 22. Inclinación del primer voladizo del viaducto sobre el Viosne (Francia, 1970). Tomado de [19]

1.4.3 Formas y mecanismos de manifestación de las patologías

Las patologías que afectan las estructuras tienen diversas formas de manifestarse, desde grietas y fisuras hasta desprendimiento del concreto, daños en los cimientos, manchas causadas por la floración del concreto o por la oxidación del acero. Cada una de estas manifestaciones son útiles para identificar problemas en la estructura a la hora de realizar una inspección visual, a continuación, se tratarán algunas de estas señales basados en manuales y documentos de inspección del CEREMA, centro de estudios y conocimientos sobre el riesgo, el medio ambiente, la movilidad y el desarrollo de Francia. [22] [23]

De las 11 divisiones que conforman este centro, la dirección técnica de infraestructura de transporte y materiales, DTecITM según sus siglas en francés (antiguo Sétra), es el encargado de operar en los campos de la ingeniería vial y el transporte. El DTecITM cuenta con múltiples manuales, catálogos, guías y códigos que rigen y soportan la mayoría de temas de infraestructura de dicho país. Varios de estos documentos están enfocados en el diseño, inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación de los puentes viga-cajón en concreto presforzado construidos por el método de los voladizos sucesivos, ya que esta tipología es la más extendida en Francia y el continente europeo. [22] [23]

1.4.3.1 Manifestaciones y patologías en la geometría de la sección transversal, dovelas y superestructura del puente.

Los defectos observados en la geometría de la sección tienen origen en diversas causas y las formas de manifestación se relacionan con deformaciones, agrietamientos, fisuras y cambios observados en la forma y estética de los elementos de la superestructura del puente. En países donde los viga-cajón han sido objeto de estudio por largos años, por ejemplo, en Francia, se han desarrollado catálogos muy precisos como el del DTecITM (ex Sétra) para el caso de secciones transversales de una sola celda como las mostradas en la figura 2, este tipo de documentos deben ser utilizados como referencias a la hora de evaluar los puentes del país ya que arrojan una luz sobre el comportamiento que puede esperarse. A continuación, se habla sobre las manifestaciones patológicas más comunes en la tipología a estudiar y las causas en las que estas se originan. [17]

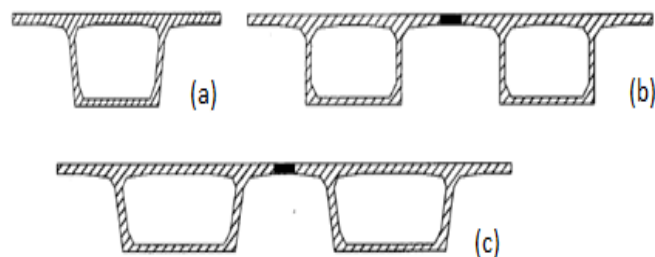


Figura 23. Secciones transversales incluidas en el catálogo del DTecITM.

Tomado de [17]

1.4.3.1.1 En las dovelas como un todo

La pérdida de contra flecha o deflexión ya sea localizada o de toda la sección longitudinal del puente es una clara manifestación de problemas en la estructura, se produce por un fallo en el ajuste durante construcción o por falta de pretensionamiento, respectivamente. Otro tipo de falla es la ruptura del perfil longitudinal del tablero por movimientos de uno o varios soportes, esto es causado por asentamientos de las pilas, deterioro o movimientos en los soportes o en el caso de un soporte en voladizo debido a las deformaciones diferidas. En el caso de tener secciones transversales como las mostradas en las figuras 20(b)

y 20 (c) donde hay una unión entre dos secciones de celda única, es muy susceptible de presentar deformaciones y desbalanceo entre las dos cajas debido a diferencias de nivel entre ellas, diferencias en el comportamiento estructural o edades de hormigón y cargas distintas. [17]

1.4.3.1.2 Grietas y fisuras

No todas las grietas y fisuras que se observan en este tipo de estructura son signo de alguna falla estructural, más sí son un signo de alerta y deben ser monitoreadas constantemente para el estudio de sus causas y su respectivo control o reparación en caso de ser necesario. Al estudiar el comportamiento de las fisuras es importante determinar si son grietas “vivas”, es decir, aquellas que continúan en movimiento o aumentando su tamaño y aquellas “muertas” que ya se han estabilizado en un estado final de movimiento. [31] Las grietas tienen un amplio rango de causas, desde el agrietamiento por flexión y cortante, por una incorrecta distribución de esfuerzos en la estructura, por temperatura, por los esfuerzos generados en las zonas de anclaje hasta aquellas generadas por la posición de los cables del pretensado y su interacción con el concreto. [19] [30]

Como ya se mencionó, es normal que las estructuras de concreto presenten fisuras bajo estado y condiciones normales de carga, por ejemplo: los puentes construidos por el método de los voladizos sucesivos suelen tener pretensionamiento solo en dirección longitudinal por lo tanto en dirección transversal se comportan como el concreto reforzado común, como consecuencia de esto, el desarrollo de patrones de agrietamiento longitudinales es normal como evidencia del comportamiento a flexión transversal del concreto reforzado. Este tipo de fisuras pueden encontrarse en la losa superior. Factores como el creep y el shrinkage y el hecho de que no todos los elementos de la estructura estén pre-comprimidos inicialmente, hace que las fisuras sean casi que inevitables en esta tipología y recuerda que no todas las grietas que desarrolla la estructura son estructuralmente problemáticas. [19] [30]

Cuando el ancho de estas supera cierto límite (mayor a 3mm o hasta 5 mm en algunos casos), más aún si esto ocurre cuando la estructura no está cargada, deben ser foco de atención ya que se consideran manifestaciones patológicas que afectan el funcionamiento y buen comportamiento estructural del puente. [19] [29] [31]

Las fisuras y grietas en las vigas cajón son usualmente el resultado de una capacidad insuficiente a flexión y cortante, mano de obra deficiente, de ignorar los esfuerzos por temperatura, procesos constructivos incorrectos o calidad de los materiales deficiente, pero en general se deben a una combinación de causas lo cual hace difícil establecer una única fuente para manifestación, precisamente, el hecho de que actúen en conjunto es lo que puede llevar a la estructura a estados límite donde la única forma que tiene de aliviar estos excesos es agrietándose. [30]

A. Fisuras por flexión

Las fisuras en las estructuras por flexión están relacionadas directamente con los esfuerzos de tensión que se generan, en el caso de vigas continuas (figura 23) se generan en la parte inferior de la viga en las zonas de momentos positivos provocando agrietamientos que atraviesan toda la losa inferior y si el fenómeno es muy severo pueden llegar hasta el alma. En las zonas de momentos negativos (apoyos) las grietas aparecen en la parte superior de la viga, aunque en esta zona son menos comunes debido a una disminución de los esfuerzos de tensión por la redistribución de momentos. Es común que este tipo de grietas ocurren generalmente en las zonas de unión entre dovelas o en las zonas cercanas. [29] [30]

Los casos más peligrosos de este tipo de agrietamiento se presentan en las zonas cercanas a los soportes cuando el cortante y la flexión se superponen causando que las grietas inicialmente verticales de la flexión se inclinen formando diagonales en el alma. La presencia de este tipo de manifestación es una señal de una resistencia insuficiente a cortante, deformaciones medibles y

apreciables a simple vista suelen acompañar estas fisuras siendo es muy peligroso ya que tanto el refuerzo como el presfuerzo que atraviese la zona queda expuesto. Tensión excesiva y agrietamientos en la zona detrás de los anclajes, también pueden causar grietas por flexión, así como la combinación de los dos efectos. [29] [30]

A continuación, se presentan las causas según diseño, construcción y uso que llevan a una baja resistencia a flexión de los puentes viga-cajón, durante el diseño de la estructura:

1. Subestimación de los esfuerzos resultantes en la estructura, de la acción de los esfuerzos por temperatura, la expansión y contracción de la estructura y del gradiente térmico.
2. Sobreestimación de la fuerza de presfuerzo inicial, por predicciones incorrectas de los efectos de disminuyen la fuerza teórica calculada o por subestimación de la relajación del acero.
3. No chequear los puntos críticos de esfuerzo al utilizar una distribución de los cables de presfuerzo donde se genere una gran excentricidad.
4. Subestimación de: peso de los equipos de construcción y de elementos permanentes no estructurales.

Durante la construcción:

1. Pérdidas causadas por la fricción que se generan entre los tendones y los ductos, especialmente aquellos que han sufrido aplastamiento.
2. Ductos mal asegurados, lo que lleva al desplazamiento de los mismos durante el vaciado del concreto y por lo tanto altera la excentricidad de los cables y produce más fricción.
3. Los acopladores de los cables de presfuerzo no quedaron aislados del concreto y por lo tanto no permite el desplazamiento de los cables cuando estos se estiran bajo carga.
4. Falla de los torones de los cables.
5. Espesores incorrectos de los elementos de concreto, por el desplazamiento de la formaleta.

Durante la vida de servicio:

1. Asentamientos diferenciales de los apoyos del puente, lo cual modifica la distribución de esfuerzos iniciales.
2. Fisuras como resultado del movimiento de los carros de avance y los otros elementos de construcción.
3. Secuencia defectuosa de fundición del concreto, que puede llevar a fisuras causadas por la retracción “shrinkage” diferencial.
4. Aumento excesivo de las cargas de tráfico con influencia de efectos dinámicos.

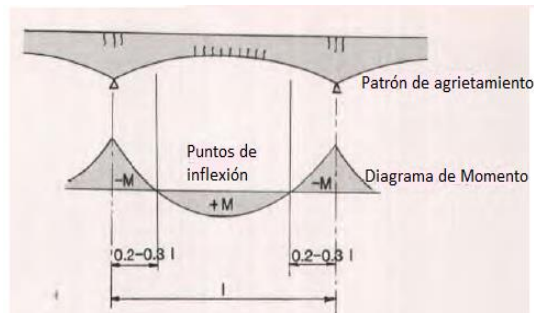


Figura 24. Diagrama de momentos y patrón de agrietamiento de la sección longitudinal de una viga-cajón continua. Tomado de [30]

B. Fisuras por cortante:

En algunos casos las fisuras pueden ser causa y desencadenante de nuevos problemas, como por ejemplo fuerza radial excesiva de los tendones. Esto puede ser causado por dos situaciones: agrietamiento longitudinal en la losa inferior causado por el empuje hacia abajo de tendones continuo en vigas de espesor variable y por el agrietamiento localizado y desprendimiento del concreto causado por un erróneo posicionamiento de los ductos de presfuerzo; desalineamiento en las juntas entre dovelas, posición incorrecta de los tendones, cambios abruptos en los ángulos de los tendones, etc. [19]

1.4.3.1.3 Otros daños y manifestaciones

Las grietas y fisuras a pesar de ser las manifestaciones patológicas más comunes, no son las únicas que pueden observarse en las estructuras como

signos de alerta. El desprendimiento del concreto (sobre todo del recubrimiento lo que deja expuesto el acero de refuerzo) en cualquier zona de la estructura es otra de los avisos de que la estructura está sufriendo algún tipo inadecuado de esfuerzos, del ataque de agentes externos o simplemente del paso del tiempo y del uso que ha tenido la estructura. El desprendimiento del concreto como ya se menciona puede presentarse tanto en la superestructura como en la infraestructura del puente, al igual que las demás manifestaciones. [53]

La necesidad de que en Colombia se invierta en la investigación para la creación del manual que regule y de los lineamientos necesarios para mantener los puentes viga-cajón en un estado óptimo de servicio es de gran importancia para la infraestructura del país, además de ser una herramienta que aporta al continuo desarrollo de muchas áreas de la economía, ya que el desarrollo de mega estructuras y el bueno estado de estas es una forma de garantizar un servicio primordial a los distintos sectores productivos: agricultura, minería, transporte, comercio, entre otros. Conocer acerca de las patologías que ya han sido registradas y tratadas en otros países en puentes con mayor antigüedad que los construidos hasta ahora en el país, no solo demuestra la realidad de los problemas que pueden enfrentar estos puentes en un futuro, sino que arroja una luz y sienta un presente clave al momento del monitoreo e identificación de patologías futuras en las estructuras nacionales.

1.5 TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO, REPARACIÓN Y REHABILITACIÓN UTILIZADAS EN LOS PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS EN CONCRETO POR EL MÉTODO DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS

Así como existe la necesidad de conocer las distintas patologías que se han presentado a lo largo de la historia de los puentes viga cajón por voladizos sucesivos, es de suma importancia tener un registro de los procedimientos de reforzamiento, mantenimiento, reparación y rehabilitación que han sido implementados en dicha tipología con resultados exitosos a nivel internacional,

ya que estos se convertirán en la base para desarrollar un sistema propio en el país.

Existen distintos tipos de tratamientos que se pueden aplicar a las estructuras dependiendo del nivel de daño y afectación de la misma, ya sean tareas de mantenimiento; en las cuales la estructura recibe tratamientos rutinarios para evitar daños graves a futuro y asegurar el funcionamiento normal y seguridad del puente, o tareas de recuperación; que son los procedimientos necesarios para devolver a la estructura su capacidad de resistencia y soporte. La restauración, por otro lado, solo restablece la estética y arquitectura de la estructura mientras que el reforzamiento corresponde a actividades que aumentan y potencian la resistencia y capacidad de carga de la misma. La rehabilitación consiste en corregir las deficiencias en una estructura, aquellas que han sido las causas de manifestaciones como grietas y fisuras, son tareas que devuelven a la estructura su correcto funcionamiento y usualmente se aplican a los elementos primarios de esta. Otros casos son la limitación de la vida útil que se aplica cuando la recuperación no es económicamente viable y en la cual se trata de que la estructura tenga un tiempo de funcionamiento limite necesario y la demolición que, al ser el tratamiento más extremo, ya sea parcial o completa, se trata de evitar a menos de que el costo de los demás procedimientos sea aún más elevado que una nueva estructura de reemplazo. [5] [26] [54]

Escoger el tratamiento correcto para las necesidades de la estructura es una de las partes más importantes y difíciles ya que para lograr este objetivo es determinante conocer la causa del problema, muchas veces las grietas, fisuras y cualquier otra de las manifestaciones no tienen una causa única, sino que son una combinación e interacción de muchas fuentes. Además, implementar cualquier elemento a la estructura requiere de un análisis previo de cómo va a afectarla como un todo; muchas veces pueden solucionarse problemas localizados, pero ocasionando daños en algún otro punto. [27] [30]

1.5.1 Técnicas de protección y mantenimiento

Existen diversos tratamientos y procesos rutinarios que pueden llevarse a cabo durante la vida de servicio de una estructura cuyo objetivo es evitar daños mayores y prevenir obras más costosas y duraderas de reparación.

Los puentes son estructuras que están conformadas por un gran número de elementos y todos tienen un comportamiento y características estructurales especiales, por esta razón, cada defecto tiene sus propias características de mantenimiento. Cada tratamiento aplicado debe ser previamente analizado: tiempo de vida antes de que se requiera un nuevo tratamiento, modo de aplicación, efectividad, etc. Todos estos factores deben ser fundamentales a la hora de escoger el más adecuado a la estructura y la situación. [27]

Los trabajos realizados usualmente consisten en la inspección, mantenimiento, reparación y reemplazo (de ser necesario) de las juntas de expansión, tablero del puente, sistemas de drenaje, barandas, barreras, pavimento, apoyos. También de tratamientos de protección anticorrosivos de los elementos de acero. En resumen, las acciones de mantenimiento pueden ser tanto de tipo correctivo como preventivo. [5]

1.5.1.1 Tratamientos para el control de la corrosión del acero y la carbonatación del concreto:

La carbonatación del concreto y la corrosión del acero son los problemas que afectan más comúnmente a las estructuras de concreto reforzado y tienen un gran impacto en la reducción de la vida de servicio de las mismas. Las barras de refuerzo de acero galvanizado son una alternativa de solución para estructuras nuevas, pero no es una solución aplicable a las ya existentes. [55]

Una de las formas de protección de estructuras antiguas son las películas barrera o sistemas de protección superficial; el método se basa en la formación de una película semiflexible y continua cuya función es ser una barrera física que no es permeable por gases como el dióxido de carbono, al agua, al vapor del agua o

cualquier otro agente agresivo para el concreto reforzado. De las barreras utilizadas en el mercado las más efectivas han demostrado ser aquellas con acrílicos, epóxidos y poliuretanos. [55]

Una de las desventajas de esta técnica es que solo se puede aplicar en estructuras nuevas o en las cuales no haya iniciado el proceso de carbonatación de concreto ya que de lo contrario el efecto puede ser contraproducente. Otra desventaja es el alto costo de algunas de las pinturas, sobre todo aquellas con un alto contenido el epóxido y poliuretano, las más económicas y de acceso fácil no son tan efectivas, alquidáticas y vinílicas. La aplicación de estas pinturas es un proceso cuidadoso y se deben seguir al pie de la letra las instrucciones dadas por el fabricante como que la superficie debe estar libre de cualquier contaminante. [55]

1.5.1.2 Otras técnicas de mantenimiento

Otros métodos de mantenimiento que han sido aplicados a los puentes en concreto son: recuperación de la sección transversal, rociar mortero, cubiertas de placas de acero. [6]

1.5.2 Técnicas de reparación, reforzamiento y rehabilitación

1.5.2.1 Adición o reemplazo del presforzado

Es la técnica de reparación y reforzamiento más usada en este tipo de estructuras y consiste en agregar más cables al sistema de presfuerzo o reemplazar el sistema inicial, la última es un procedimiento más tedioso y complejo ya que el presfuerzo inicial debe ser desmantelado y puede ser incluso más difícil si los tendones se encuentran embebidos en el concreto, como ocurre en el caso de la mayoría de puentes en Colombia. [19]

Los tendones pueden añadirse tanto para el presfuerzo longitudinal como en transversal, en el primero los cables pueden seguir una trayectoria rectilínea (no es tan eficiente y solo tiene un pequeño efecto en la mejora del cortante) o

poligonal (es más eficiente, solo que presenta mayores pérdidas por la fricción causada por los bloques de desviación necesarios para darle inclinación a los cables) y los anclajes adicionales pueden estar ubicados más allá de los estribos del puente o dentro de la viga-cajón (ubicación más común). En el presfuerzo transversal adicional puede estar ubicado en la losa inferior, en las almas o en ambos. [19] [30]

El refuerzo adicional también puede ser realizado por medio de tendones externos, este método debería ser complementado de ser posible con inyecciones de mortero en las fisuras ya que permiten que el esfuerzo de compresión aplicado sea transferido exitosamente. Los tendones externos deben estar rígidamente unidos a la superestructura a intervalos suficientemente cortos para evitar el volcamiento de la viga y prevenir que los cables entren en resonancia si el periodo de los mismos es cercano al periodo de la estructura. [30]



Figura 25. Presfuerzo transversal adicional de la losa inferior. [30]



Figura 26. Presfuerzo vertical adicional en el alma y presfuerzo transversal de la losa inferior. [30]

1.5.2.2 Epoxi o inyección de mortero

Siendo otra de las técnicas de reparación más comunes de las estructuras de concreto en general, su uso también es aplicable para el relleno de fisuras en los puentes viga-cajón con fines de reparación y mantenimiento. Existen dos factores que en el caso de los puentes viga-cajón puede disminuir su efectividad: Si durante el proceso de inyección o fraguado del mortero el ancho de las fisuras continúa aumentando, es muy probable que el tratamiento pierda su eficacia. El continuo ensanchamiento de las grietas puede ser causado por las cargas de tráfico o por el gradiente térmico. Estos inconvenientes pueden evitarse al cerrar la estructura al tráfico y mantener la superficie del tablero fría regándolo con agua constantemente durante la aplicación del tratamiento. [30]

El segundo factor es la presión de la inyección utilizada en las grietas, ya que al ser esta aplicada en fisuras ubicadas en zonas donde normalmente no hay refuerzo, la presión puede propiciar la propagación de las grietas. Para evitar este problema se utilizan inyecciones de baja presión o un mecanismo de presión externo que mantenga las dos porciones de la grieta juntas durante el proceso. [30]

1.5.2.3 Ajuste del nivel de los soportes

Esta medida de rehabilitación se utiliza en caso de grietas causadas por la flexión y consiste en un método de pretensado por medio del cual los soportes son elevados de tal manera que se produce un momento que causa esfuerzos de compresión en los puntos necesarios. Es un método muy atractivo por su relativamente sencilla implementación y bajo costo. Sin embargo, es una solución de corto plazo ya que al ser un método que desplaza la estructura, la redistribución de momentos que se origina puede eliminar los efectos compresivos de la elevación de los soportes. [30]

Este tratamiento es solo una solución temporal, que es adecuada solo hasta que una rehabilitación permanente pueda ser llevada a cabo o como una forma de crear compresión luego de una inyección de mortero (epoxi) para permitir su correcto fraguado. En Francia, esta técnica fue aplicada a un puente de 15 años de edad y se observó que el momento producido por la elevación de los soportes había disminuido en un 20% en los 16 meses siguientes a la realización de la operación y estimo que alrededor de los 3 años luego del procedimiento el momento restante sería menos de la mitad de la inicial, lo que comprueba la efectividad limitada de dicho tratamiento. [30]

1.5.2.4 Reparación y fortalecimiento por medio de fibras de carbono

Los plásticos reforzados con fibra de carbono, al ser un material compuesto, tienen un comportamiento muy eficiente a tensión y una gran resistencia a agentes externos, estas buenas características estructurales han hecho que este tipo de material sea utilizado para la reparación y fortalecimiento de las estructuras de concreto. [56]

Una de las desventajas es que es un material nuevo y por lo tanto no hay tantos estudios en esta área, además, las especificaciones técnicas dadas por el fabricante son limitadas e insuficientes a la hora de su instalación. A su vez, en las zonas donde ya existe agrietamiento o en las juntas secas, el mecanismo de refuerzo tiende a fallar antes de alcanzar su capacidad de diseño máxima. [56]

Existen varias formas de utilizar las fibras de carbono en el tratamiento de las estructuras de concreto, algunos ejemplos son:

- Instalación de una malla bidireccional de acuerdo al procedimiento Freyssinet TFC: consiste en un sistema de refuerzo estructural flexible y deformable, basado en la adhesión de fibras de carbono a la estructura de concreto con una resina epoxi. Su funcionamiento se centra en añadir a la superficie de la estructura un material que es resistente a la tracción lo que permite aumentar su capacidad de carga. Es un sistema útil ya que se amolda con facilidad a la forma del elemento a reforzar y además no genera esfuerzos concretados en ningún punto del elemento. [56]
- Láminas de refuerzo de fibra de carbono unidireccionales CFK, fabricadas por S & P Clever Reinforcement Company, aplicadas siguiendo el procedimiento de Bettor Mbrace: consiste en bandas de fibra de carbono impregnadas de una resina epoxi y parcialmente pretensadas que alcanzan módulos de elasticidad cercanos a los del acero; esto se traduce en una mejor capacidad a tensión lo que permite que el área a utilizar se reduzca. Es un material más homogéneo pero su instalación requiere gran atención y cuidado. [56]

Para la instalación de ambos métodos es importante resaltar que alguna parte del recubrimiento de hormigón debe ser removida, lo que asegura la correcta adherencia de la fibra a la estructura. [56]

1.5.2.5 Reparaciones que fortalecen la estructura a flexión

Existen varios métodos utilizados para darle mayor resistencia a flexión a estructuras que han tenido problemas por este tipo de esfuerzos: Soportar la losa inferior por medio de un sistema de suspensión (figura 23), aumentar el espesor del alma inferior o añadir riostras transversales que ayudan a resistir los esfuerzos a flexión. [30]

Es muy importante que antes de que cualquiera de estas medidas sea implementado, se tenga la certeza de la causa de la falla y, además, se haya

realizado un análisis de cómo pueden variar los esfuerzos en los otros puntos de la estructura; ya que al solucionar un problema localizado se puede estar causando daños nuevos a la estructura. A su vez, al ser tratamiento que adicionan nuevos elementos que no estaban contemplados en el diseño inicial del puente, se deben proporcionar soportes externos que permitan resistir correctamente las cargas para que el daño inicial no se agrave. El objetivo final de estos métodos es devolver los elementos a su estado inicial de esfuerzos y deformaciones, de otra manera la efectividad es incierta. [30]

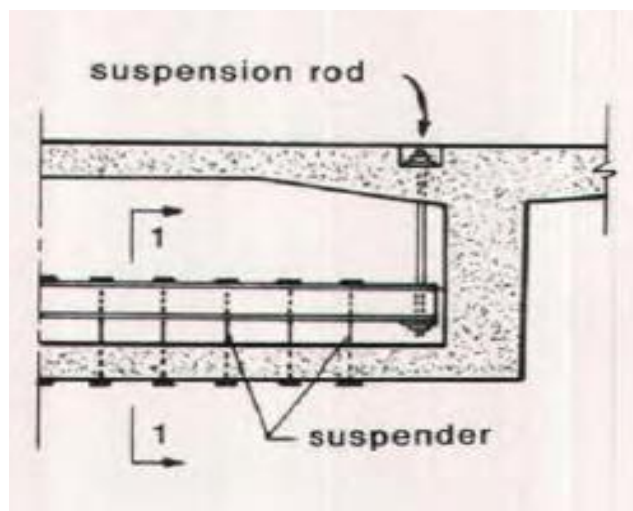


Figura 27. Sistema de reparación por medio de la suspensión de la losa inferior. [30]

1.5.2.6 Reparación de grietas por cortante

Las grietas por cortante suelen ocurrir en las almas de la viga y se pueden identificar por su localización e inclinación de aproximadamente 45° . Una manera de reparar las patologías causadas por los esfuerzos cortantes en las almas es adicionando presfuerzo vertical en el centro del alma después de realizar una inyección de mortero en las grietas. Es un proceso delicado que inicia con el retiro del recubrimiento y pavimento de la losa superior, luego se procede a marcar sobre el concreto con tiza la ubicación teórica de los nuevos tendones de refuerzo y las zonas de anclaje son abiertas en la placa superior con un martillo neumático ligero (esta parte debe realizarse muy cuidadosamente ya que se deja expuesto la capa superior del acero de refuerzo y los conductos longitudinales

del presfuerzo). Por último, se inicia con el proceso de perforación del alma si no hay interferencia del refuerzo existente (Figura 24a) o en el caso de que haya interferencia se utilizaran dos tendones a lado y lado del alma como en la figura 24b. [30]

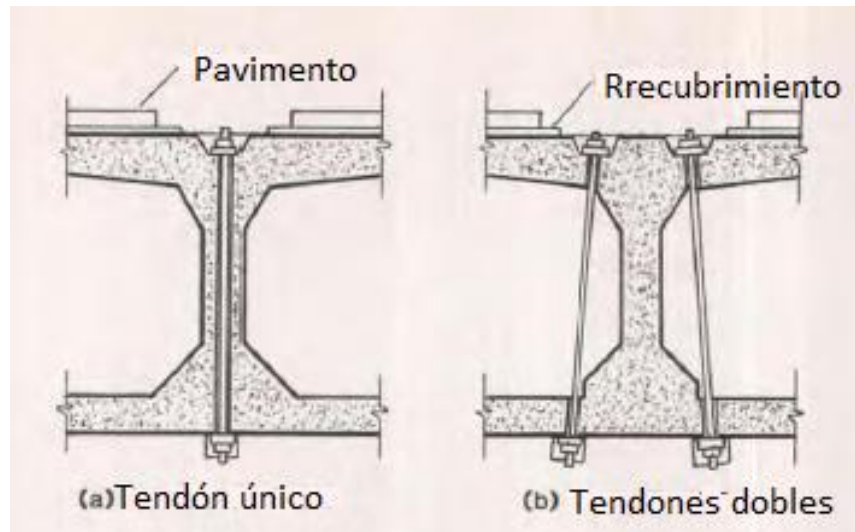


Figura 28. (a) Técnica de reforzamiento a cortante con tendón único de refuerzo en el alma. (b) Técnica de reforzamiento a cortante con tendones dobles de refuerzo en el alma. [30]

Este método es ideal teóricamente, pero tiene desventajas como la ubicación tan superficial de los anclajes que los hace muy susceptibles a los ataques químicos, también al ser tendones tan cortos las pérdidas son bastante grandes y es muy difícil obtener las fuerzas calculadas en el diseño inicial, sumado a esto, la perforación completa del alma en el caso de la figura 24a es un proceso muy complicado y casi imposible lo que no hace viable este tratamiento la mayoría de veces. En el caso de la figura 24b, se elimina el problema de la perforación total del alma, pero aparecen otras desventajas adicionales como transferir el cortante a las losas. [30]

1.5.3 Guía metodológica para el diseño de reparaciones estructurales y refuerzo del CEREMA.

En Francia existe un documento expedido por el CEREMA que consta de 148 páginas llamado “Guía metodológica para el diseño de reparaciones estructurales y de refuerzo”; este documento está enfocado específicamente a las necesidades de los puentes viga-cajón en concreto construidos por el método de los voladizos sucesivos.

La guía expone un paso a paso general de la elaboración de un proyecto de reparación (desde todos los aspectos técnicos y de análisis estructural hasta el campo de la contratación, seguridad, agentes involucrados, etc. del proyecto), reconociendo que cada caso tiene necesidades particulares, ya que cada puente posee características únicas a causa de su construcción, materiales, exposición a las condiciones medio ambientales y su uso. Un proyecto de reparación se basa en la inspección y conocimiento del previo estado de la estructura, los estudios realizados y diagnósticos anteriores son fundamentales para este tipo de procesos. [57]

“Un manejo exitoso de la infraestructura es fundamental para el crecimiento económico y la competitividad internacional de un país”, se debe tener conciencia del envejecimiento de los puentes y de que con mucha frecuencia estos ven excedida su vida de servicio y su capacidad. [27] [58]

2. FICHAS TÉCNICAS

Uno de los objetivos iniciales fue la identificación y recopilación de toda información disponible de los puentes viga-cajón construidos por el método de los voladizos sucesivos que se encuentran en la red vial del departamento de Santander; con el fin de elaborar un inventario de fichas técnicas.

La información se obtuvo tanto de manera presencial como digital. A pesar de que en Colombia existe un inventario de puentes del SIPUCOL que es administrado por el INVIAS, no fue posible obtener la información de esta fuente; en primer lugar, la mayoría de los puentes no se encuentran aún registrados en dicha base de datos y en segunda instancia porque es un sistema desorganizado que no permite la búsqueda eficaz ni el acceso completo al usuario.

En el anexo 1 se pueden encontrar las fichas técnicas mencionadas de los puentes más representativos construidos hasta el día de hoy en Santander de la tipología en estudio y adicionalmente se presentan algunos que han marcado hitos en el país, como el puente Juanambú, que el primer puente de esta tipología en el país, además de ser ganador del premio nacional de ingeniería en 1972. [1]

3. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Con el fin de que los puentes viga-cajón que han sido construidos en el país no se conviertan en estructuras abandonadas y su vida de servicio no se vea interrumpida de manera prematura por la aparición de posibles patologías; a su vez, teniendo en mente que es una tipología que se establecerá como una de las más utilizadas, sino la mas, para cubrir grandes luces en la geografía altamente montañosa de la región, se realizó la elaboración de una propuesta de investigación cuyo objetivo principal será: determinar la probabilidad de existencia de patologías por efectos reológicos a largo plazo en puentes viga-cajón de grandes luces en Colombia.

Al demostrar lo anterior, se busca exponer la clara necesidad de que instituciones estatales como el INVIAS y la ANI presten especial atención a la problemática y se vinculen en la investigación y posterior elaboración de un manual (cuyo primer borrador será uno de los productos de la investigación que se busca financiar) que contenga los lineamientos para el correcto tratamiento que estas superestructuras requieren.

La propuesta será presentada, para ser financiada, en la convocatoria de modalidad libre con aporte en efectivo de la **VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN – VIE** de la Universidad Industrial de Santander en el año 2018. En el anexo 2 se encuentra el primer esbozo de la propuesta redactada y lista para su presentación a la convocatoria.

4. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Con la elaboración del primer esbozo de la propuesta de investigación (anexo 2), que es un insumo para el grupo de investigación INME; el cual se encargara de llevar la misma a la convocatoria de financiación interna de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, se da por alcanzado el objetivo general.

También se alcanzaron los tres objetivos específicos, el primero y el segundo referentes a la recopilación de información presente tanto en la literatura científica internacional como nacional sobre las patologías, técnicas de reparación, reforzamiento y rehabilitación se observan en el cuerpo del artículo. Por ultimo las fichas técnicas se encuentran anexas al documento principal (anexo 1)

El auge de los puentes viga-cajón de grandes luces en Colombia requiere que desde ya se preste atención a su comportamiento, especialmente a largo plazo, permitiendo prever y evitar que su vida de servicio se vea interrumpida prematuramente trayendo consecuencias de gran impacto social y económico para muchos sectores del país.

Las deflexiones excesivas a largo plazo que han sido objeto de estudio y preocupación a nivel internacional justifican que el futuro comportamiento estructural y patológico de estos puentes también sea un foco de atención en el área de la ingeniería de puentes en Colombia; se debe tomar como base y precedente todos los estudios y acontecimientos observados en otros países para poder tomar medidas que permitan a la infraestructura del país estar preparada para enfrentar dichos problemas y no que las situaciones tomen al país por sorpresa.

Por otro lado, la inversión para el estudio de la tipología y el desarrollo de técnicas de mantenimiento, además de la construcción del manual especialmente enfocado a los viga-cajón contruidos por voladizos sucesivos,

puede darles un nuevo impulso a estos puentes en el país, lo que implica que se observara un gran desarrollo de la infraestructura vial, repercutiendo positivamente en todos los ámbitos; social, económico, cultural.

Una de las observaciones que surge a partir de la búsqueda en la literatura internacional, es la necesidad de que en Colombia se establezca un sistema de monitoreo de puentes que sea más efectivo y organizado; el SIPUCOL, que es el sistema existente, para comenzar no cuenta con un inventario completo y actualizado de las estructuras del país, tampoco establece pautas claras de inspección y no expone lineamientos claros para el diagnóstico de patologías, técnicas de mantenimiento (especialmente estructural) y métodos de identificaron del tratamiento más adecuado para cada caso.

REFERENCIAS

- [1] Gerardino, M. (2011). Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos Sucesivos (Doctoral dissertation, Tesis de Master Universidad Politécnica de Cataluña)
- [2] Guo, T., Chen, Z., Liu, T., & Han, D. (2016). Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. *Engineering Structures*, 117, 358-371.
- [3] Resolución N°1528. Por la cual se implementa el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL de la Red Vial Nacional, la Ficha Técnica de Información de SIPUCOL y se dictan otras disposiciones, Colombia, 23 de mayo de 2017.
- [4] Miyamoto, A., Kawamura, K., & Nakamura, H. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(1), 45-55.
- [5] Santos, J., Nunes, C., Fernandes, C., & Varum, H. (2007). Common pathologies in RC bridge structures: A statistical analysis. Retrieved
- [6] Miyamoto, A., Kawamura, K., & Nakamura, H. (2001). Development of a bridge management system for existing bridges. *Advances in Engineering Software*, 32, 821-833.
- [7] Park, S., Stubbs, N., Bolton, R., Choi, S., & Sikorsky, C. (2001). Field verification of the damage index method in a concrete box-girder bridge via visual inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16(1), 58-70.
- [8] Muñoz, E., Hernández, R., Valbuena, E., Trujillo, L., & Santacruz, L. (2011). Rehabilitación de los puentes de la Red de Carreteras de Colombia, basados en

inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación. *Revista Ingeniería de Construcción*, 20(1), 61-84.

[9] Cabrera Martínez, J. Estudio aplicado de los costes de la prevención de riesgos laborales en la construcción de puentes de hormigón, Minor Thesis; Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

[10] Hablemos de puentes de concreto en Colombia. Available: <http://blog.360gradosenconcreto.com/hablemos-de-puentes-de-concreto-en-colombia/> [Citado Julio de 2017].

[11] Recta final para construcción de obras en Hidrosogamoso. Available: <http://www.vanguardia.com/economia/local/252006-recta-final-para-construccion-de-obras-en-hidrosogamoso>. [Citado Julio de 2017].

[12] García Giraldo, J. M., Ospina Giraldo, J., & Graciano Gómez, E. A. (2014). La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia. *Revista EIA*, 11(22), 119-131. doi:10.14508/reia.2014.11.22.119-131.

[13] Russky, el puente de los mil millones de dólares. Available: <https://destinoinfinito.com/puente-russky-millonario/>. [Citado agosto de 2017]

[14] Benjumea, J. M., Chio Cho, G., & Maldonado, E. (2012). Puentes extradados: Evolución y tendencias actuales. *Tecnura*, Vol 16, Iss 33, Pp 173-188 (2012), (33), 173.

[15] Schlaich, J., & Scheef, H. (1982). *Concrete box-girder bridges* (Vol. 1). IABSE. p. 1-9.

[16] Manterola, J. (1984). Evolución de los puentes en la historia reciente. *Informes De La Construcción*, Vol 35, Iss 359-360, Pp 5-35 (1984), (359-360), 5.

[17] CEREMA: La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra, (1997), DT360: Catalogue des principaux desordres – Pont a poutre caisson en beton precontraint.

[18] Valle, R., Carvajal, N. F., & Botero, J. C. (2017). Evolución de los parámetros geométricos de diseño en puentes construidos con voladizos sucesivos in situ. UIS Ingenieras, 16(1), 82-96.

[19] Prestressed concrete bridges built using the cantiliver method-SETRA, Ministere de l'Écologie du Developpment et de l'Aménagement durables, Francia, 2003. p 8-19. p 195-207.

[20] Puente Guillermo Gómez Ortiz, obra del proyecto Sogamoso. ISAGEN. Available: <https://www.facebook.com/IsagenEnergiaProductiva/>. [Citado septiembre de 2017]

[21] SIPUCOL, Sistema de Puentes de Colombia. Ministerio de Transporte, Colombia. Ministerio de Transporte de Dinamarca, Instituto Nacional de Vías, Dirección de Carreteras. Manual de usuario, Generalidades. 1997.

[22] CEREMA, La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra. Available: <http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/la-direction-technique-infrastructures-de-r1147.html>. [Citado agosto 2017]

[23] What is the Cerema? Available: <http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/what-is-the-cerema-a5938.html>. [Citado agosto 2017]

[24] Muñoz, E.E., Valbuena, E.A., y Hernández, R. (2004). “Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional, basados en inspecciones principales”, II Jornadas de Ingeniería Civil en Cuba, Santiago de Cuba.

- [25] Ripper, T., & Souza, V. (1998). Pathology, rehabilitation and strengthening of concrete structures.
- [26] Tadeu, N., & Sartorti, A. L. (2011). Identification and analysis of pathologies in bridges of urban and rural roads. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(1), 5-24.
- [27] Chassiakos, A. P., Vagiotas, P., & Theodorakopoulos, D. D. (2005). A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges. *Advances in Engineering Software*, 36(11), 740-749.
- [28] Rehman, K. U., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 58-86.
- [29] Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías INVIAS, Ministerio de Transporte. 2006. p 28-41.
- [30] Podolny, W. (1985). The cause of cracking in post-tensioned concrete box girder bridges and retrofit procedures. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, 30(2), 82-139.
- [31] Patología de estructura de hormigón armado (Patologías del concreto). Available: <http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Publicaciones/pub-val/Patologia/trasparencias%20patologia.pdf>. [Citado Julio de 2017]
- [32] Bažant, Z. P., Yu, Q., & Guang-Hua Li. (2012). Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: Record-span bridge in palau and other paradigms. *Journal of Structural Engineering*, 138(6),

- [33] Ranaivomanana, N., Multon, S., & Turatsinze, A. (2013). Basic creep of concrete under compression, tension and bending. *Construction and Building Materials*, 38, 173-180.
- [34] Diaz Duran, E. F., Santos Duran, C. M., & Benjumea Royero, Jose Miguel, dir. (2014). Efecto de la humedad relativa en el comportamiento estructural de un puente viga cajón construido por el método de voladizos sucesivos [recurso electrónico], Bucaramanga: UIS, 2014.
- [35] Bažant, Z. P., & Panula, L. (1978). Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. *Materials and Structures*, 11(5), 317-328.
- [36] Yazdizadeh, Z., Marzouk, H., & Hadianfard, M. A. (2017). Monitoring of concrete shrinkage and creep using fiber bragg grating sensors. *Construction and Building Materials*, 137, 505-512.
- [37] Su, L., Wang, Y., Mei, S., & Li, P. (2017). Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep. *Construction and Building Materials*, 152, 250-258.
- [38] Bazant, Z. P., & Carol, I. (1993). Creep and shrinkage of concrete. E & FN Spon. p 77-82.
- [39] Kristek, V., Bazant, Z. P., Zich, M., & Kohoutkova, A. (2006). Box girder bridge deflections. *Concrete international*, 28(01), 55-63.
- [40] Bažant, Z.,k P., Yu, Q., & Li, G. (2012). Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: Numerical analysis and lessons learned. *Journal of Structural Engineering*, 138(6), 687.
- [41] Tong, T., Liu, Z., Zhang, J., & Yu, Q. (2016). Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage,

static creep and traffic-induced cyclic creep. *Engineering Structures*, 127, 510-524.

[42] Kamatchi, P., Rao, K. B., Dhayalini, B., Saibabu, S., Parivallal, S., Ravisankar, K., & Iyer, N. R. (2014). Long-term prestress loss and camber of box-girder bridge. *ACI Structural Journal*, 111(6), 1297-1306.

[43] Pan, Z., Lu, Z., & Fu, C. C. (2011). Experimental study on creep and shrinkage of high strength plain concrete and reinforced concrete. *Advances in Structural Engineering*, 14(2), 235-247.

[44] Treacy, M. A., & Brühwiler, E. (2015). A direct monitoring approach for the fatigue safety verification of construction joint details in an existing post-tensioned concrete box-girder bridge. *Engineering Structures*, 88, 189-202.

[45] Sasaki, K. K., Paret, T., Araiza, J. C., & Hals, P. (2010). Failure of concrete T-beam and box-girder highway bridges subjected to cyclic loading from traffic. *Engineering Structures*, 32, 1838-1845.

[46] Marchão, C. A. D. C. (2015). Optimisation and design of post-tensioning anchorage corner blisters in concrete box girder bidges.

[47] Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/13028/index.cfm>. [Citado agosto de 2017]

[48] Pillai, R. G., Hueste, M. D., Gardoni, P., Trejo, D., & Reinschmidt, K. F. (2010). Time-variant service reliability of post-tensioned, segmental, concrete bridges exposed to corrosive environments. *Engineering Structures*, 32, 2596-2605.

- [49] Pimentel, M., Santos, J., & Figueiras, J. (2008). Safety appraisal of an existing bridge via detailed modelling. In International FIB Symposium 2008: Tailor Made Concrete Solutions, New Solutions for our Society.
- [50] Suarez, J., Zhang, J., Hsuan, G., & Hartt, W. (2006). Polyethylene duct cracking on posttensioning tendons in florida segmented bridges. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 581. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=21603176&lang=es&site=eds-live>
- [51] Chaussin, R. & Chabert, A., (1987), CEREMA: La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra, DT474: Ponts en béton précontraint – Le problema des zones d’ancrage.
- [52] Ruan, X., Shi, X., & Li, X. (2012). Failure analysis of tendon breakout on bottom slab of a pre-stressed concrete box gird bridge during construction. *Engineering Failure Analysis*, 25, 291-303.
- [53] CEREMA: La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra, (1997), DT358: Catalogue des principaux desordres – Pile caisson.
- [54] Colás, A. A. Propuesta de un software para el proceso de evaluación del estado técnico-constructivo de los puentes. Tesis de Máster en Carreteras y Puentes. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2009.
- [55] Serrano Ixtepan, D., & Moreno, E. I. (2006). Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. *Ingeniería*, 10(2).
- [56] Ramos, G., Casas, J. R., & Alarcón, A. (2004). Repair and strengthening of segmental bridges using carbon fibers. *Engineering structures*, 26(5), 609-618.

[57] Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art

[58] Quirk, L., Matos, J., Murphy, J., & Pakrashi, V. (2017). Visual inspection and bridge management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-13.

BIBLIOGRAFÍA

ARGOS. Blog 360° en Concreto. Hablemos de puentes de concreto en Colombia. [en línea]. Citado Julio de 2017. Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/hablemos-de-puentes-de-concreto-en-colombia/>.

BAŽANT, Zdeněk, YU, Qiang, & GUANG-HUA, Li. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: Record-span bridge in palau and other paradigms. *Journal of Structural Engineering*, 2012, vol. 138, no. 6.

BAŽANT, Zdeněk, YU, Qiang, & GUANG-HUA, Li. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: Numerical analysis and lessons learned. *Journal of Structural Engineering*, 2012, vol. 138, no. 6, p. 687.

BAŽANT, Zdeněk., & CAROL, Ignacio. *Creep and shrinkage of concrete*. E & FN Spon. 1993, p 77-82.

BAŽANT, Zdeněk., & PANULA, Liisa. Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. *Materials and Structures*, 1978, vol. 11, no. 5, p. 317-328.

BENJUMEA, José. Miguel., CHIO CHO, Gustavo., & MALDONADO, Esperanza. *Puentes extradados: Evolución y tendencias actuales*. Tecnura, 2012, Vol 16, Iss 33, p. 173-188.

CABRERA MARTÍNEZ, Jorge. *Estudio aplicado de los costes de la prevención de riesgos laborales en la construcción de puentes de hormigón*, Minor Thesis; Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

CEREMA, La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecTM) - ex Sétra. [en línea]. Citado agosto 2017. Disponible en: Available:

<http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/la-direction-technique-infrastructures-de-r1147.html>.

CEREMA. La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra, DT360: Catalogue des principaux desordres – Pont a poutre caisson en beton precontraint. 1997.

CEREMA. What is the Cerema? [en línea]. Citado agosto 2017. Disponible en : <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/what-is-the-cerema-a5938.html>.

CEREMA: Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art. ? [en línea]. Disponible en: <http://www.cerema.fr/guide-conception-des-reparations-structurales-et-a1476.html>.

CEREMA: La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra. DT358: Catalogue des principaux desordres – Pile caisson. 1997.

CHASSIAKOS, A. P., VAGIOTAS, P., & THEODORAKOPOULOS, D. D. A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges. *Advances in Engineering Software*, 2005, vol. 36, no. 11, p. 740-749.

CHAUSSIN, Robert. & CHABERT, Alain., (1987), CEREMA: La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra, DT474: Ponts en béton précontraint – Le problema des zones d'ancrage.

COLÁS, Abel Alberty. Propuesta de un software para el proceso de evaluación del estado técnico-constructivo de los puentes. Tesis de Máster en Carreteras y Puentes. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2009.

DESATINO INFINITO. Russky, el puente de los mil millones de dólares. [en línea]. Disponible en: <https://destinoinfinito.com/puente-russky-millonario/>. Citado agosto de 2017.

DIAZ DURAN, Edgar Fabian., SANTOS DURAN, Cesar Mauricio, & BENJUMEA ROYERO, Jose Miguel. Efecto de la humedad relativa en el comportamiento estructural de un puente viga cajón construido por el método de voladizos sucesivos [recurso electrónico], Bucaramanga: UIS, 2014.

GARCÍA GIRALDO, John. Mario., OSPINA GIRALDO, Jaime., & GRACIANO GÓMEZ, Edir. Amparo. La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia. Revista EIA, 2014, vol. 11, no. 22, p. 119-131.

GERARDINO, Marlio. Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos Sucesivos (Doctoral dissertation). Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.

GUO Tong, CHEN Zheheng., LIU Tie, & HAN, Dazhang. Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. Engineering Structures. 2016, p. 117, 358-371.

ISAGEN. Puente Guillermo Gómez Ortiz, obra del proyecto Sogamoso. [en línea]. Citado septiembre de 2017. Disponible en: <https://www.facebook.com/IsagenEnergiaProductiva/>.

KAMATCHI, Palaniyandi., RAO, Kanchi Balaji., DHAYALINI, B., SAIBABU, S., PARIVALLAL, Shri., RAVISANKAR, Kapali, & IYER, Nagesh. R. Long-term prestress loss and camber of box-girder bridge. ACI Structural Journal, 2016, vol. 111, no. 6, p. 1297-1306.

KRISTEK, Vladimír., BAŽANT, Zdeněk, ZICH, Miloš., & KOHOUTKOVA, Alena. Box girder bridge deflections. Concrete international, 28(01), 55-63.

MANTEROLA, Javier. Evolución de los puentes en la historia reciente. Informes De La Construcción, 1984, vol 35, Pp 5-35.

MARCHÃO, Carla Alexandra. Optimisation and design of post-tensioning anchorage corner blisters in concrete box girder bridges, 2015.

MIYAMOTO, Ayaho., KAWAMURA, Kei., & NAKAMURA, Hideaki. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 15, no. 1, p. 45-55.

MIYAMOTO, Ayaho., KAWAMURA, Kéi., & NAKAMURA, Hideaki. Development of a bridge management system for existing bridges. Advances in Engineering Software, 2001, no. 32, p. 821-833.

MUÑOZ, Edgar, VALBUENA, Edgar, Y HERNÁNDEZ, R. "Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional, basados en inspecciones principales", II Jornadas de Ingeniería Civil en Cuba, Santiago de Cuba. 2004.

MUÑOZ, Edgar., HERNÁNDEZ, Rafael., VALBUENA, Edgar., TRUJILLO, Luz., & SANTACRUZ, Libardo. Rehabilitación de los puentes de la Red de Carreteras de Colombia, basados en inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación. Revista Ingeniería de Construcción, 2011, vol. 20, no. 1, p. 61-84.

PAN, Zuanfeng., LU, Zhitao., & FU, Chung. Experimental study on creep and shrinkage of high strength plain concrete and reinforced concrete. Advances in Structural Engineering, 2011, vol. 14, no. 2, p. 235-247.

PARK, Sooyong., STUBBS, Norris., BOLTON, Robert., CHOI, Sanghyun., & SIKORSKY, Charles. Field verification of the damage index method in a concrete

box-girder bridge via visual inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2001, vol. 16, no. 1, p. 58-70.

PÉREZ VALCÁRCEL, Juan. Patología de estructura de hormigón armado (Patologías del concreto). [en línea]. Citado Julio de 2017. Disponible en: <http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Publicaciones/pub-val/Patologia/trasparencias%20patologia.pdf>.

PILLAI, Radhakrishna, HUESTE, Mary Beth, GARDONI, Paolo., TREJO, David., & REINSCHMIDT, Kenneth. Time-variant service reliability of post-tensioned, segmental, concrete bridges exposed to corrosive environments. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32, p. 2596-2605.

PIMENTEL, Mário., SANTOS, José., & FIGUEIRAS, Joaquim. Safety appraisal of an existing bridge via detailed modelling. In *International FIB Symposium 2008: Tailor Made Concrete Solutions, New Solutions for our Society*. 2008.

PODOLNY, Walter. The cause of cracking in post-tensioned concrete box girder bridges and retrofit procedures. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, 1985, vol. 30, no. 2, p. 82-139.

QUIRK, Lucy., MATOS, Jose., MURPHY, Jimmy., & PAKRASHI, Vikram. Visual inspection and bridge management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, p. 1-13.

RAMOS, Gonzalo., CASAS, Joan., & ALARCÓN, Antonio. Repair and strengthening of segmental bridges using carbon fibers. *Engineering structures*, 2004, vol. 26, no. 5, 609-618.

RANAIVOMANANA, Narintsoa., MULTON, Stéphane., & TURATSINZE, Anaclet. Basic creep of concrete under compression, tension and bending. *Construction and Building Materials*, 2013, p. 173-180.

REHMAN, Sardar Kashif Ur., IBRAHIM, Zainah., MEMON, Sahzim Ali., & JAMEEL, Mohammed. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 2016, p. 58-86.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de Transporte. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías INVIAS, Ministerio de Transporte. 2006. p 28-41.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de Transporte. Resolución 1528 del 23 de mayo de 2017. Por la cual se implementa el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL de la Red Vial Nacional, la Ficha Técnica de Información de SIPUCOL y se dictan otras disposiciones.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de Transporte. SIPUCOL, Sistema de Puentes de Colombia. Colombia. Ministerio de Transporte de Dinamarca, Instituto Nacional de Vías, Dirección de Carreteras. Manual de usuario, Generalidades. 1997.

RIPPER, Thomaz., & SOUZA, Vicente. Pathology, rehabilitation and strengthening of concrete structures. 1998, vol. 16, no. 1.

RUAN, Xin., SHI, Xuefei., & LI, Xiaoxiang. Failure analysis of tendon breakout on bottom slab of a pre-stressed concrete box gird bridge during construction. *Engineering Failure Analysis*, 2012, p. 291-303.

SANTOS, Joao., NUNES, Claudia., FERNANDES, Catarina., & VARUM, Humberto. (2007). Common pathologies in RC bridge structures: A statistical analysis. Retrieved *Electronic Journal of Structural Engineering*. Department of Civil Engineering, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, no. 7, 2007, p. 3810-193.

SASAKI, Kent, PARET, Terry., ARAIZA, Juan, & HALS, Peder. Failure of concrete T-beam and box-girder highway bridges subjected to cyclic loading from traffic. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32, p. 1838-1845.

SCHLAICH, Jorg., & SCHEEF, Harsmut. Concrete box-girder bridges. IABSE. 1982, vol. 1. p. 1-9.

SERRANO, Ixtepan & MORENO, Eric. Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. *Ingeniería*, 2006, vol. 10, no. 2.

SETRÁ. Prestressed concrete bridges built using the cantiliver method-SETRA, Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement durables, Francia, 2003. p 8-19. p 195-207.

SU, Li., WANG, Yuan-feng., MEI, Sheng-qi., & LI, Peng-fei. Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep. *Construction and Building Materials*, 2017, p. 250-258.

SUAREZ, Jorge., ZHANG, Jingyu., HSUAN, Grace., & HARTT, William. Polyethylene duct cracking on posttensioning tendons in florida segmented bridges. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 581. 2006. [en línea]. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=21603176&lang=es&site=eds-live>

TADEU, Nilson., & SARTORTI, Artur. Lenz. (2011). Identification and analysis of pathologies in bridges of urban and rural roads. *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 26, no. 1, p. 5-24.

TONG, Teng., LIU, Zhao., ZHANG, Jie., & YU, Qiang. Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage,

static creep and traffic-induced cyclic creep. *Engineering Structures*, 2016, p. 510-524.

TREACY, Mark, & BRÜHWILER, Eugen. A direct monitoring approach for the fatigue safety verification of construction joint details in an existing post-tensioned concrete box-girder bridge. *Engineering Structures*, 2015, vol. 88, p. 189-202.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts. [en línea]. Citado agosto de 2017. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/13028/index.cfm>.

VALLE, Ruben., CARVAJAL, Nestor Freddy., & BOTERO, Juan Carlos. Evolución de los parámetros geométricos de diseño en puentes construidos con voladizos sucesivos in situ. *UIS Ingenieras*. 2017, vol. 16, no. 1, p. 82-96.

VANGUARDIA LIBERAL. Recta final para construcción de obras en Hidrosogamoso. Disponible en: <http://www.vanguardia.com/economia/local/252006-recta-final-para-construccion-de-obras-en-hidrosogamoso>. Citado Julio de 2017. [en línea].

YAZDIZADEH, Zahra., MARZOUK, Hesham., & HADIANFARD, Mohammad Ali. Monitoring of concrete shrinkage and creep using fiber bragg grating sensors. *Construction and Building Materials*, 2017, p. 505-512.

ANEXOS

ANEXO 1. FICHAS TÉCNICAS

Ficha técnica

Nombre:	
El puente de la Unión	
Localización:	
Paralelo al viaducto García Cadena, vía Bucaramanga-Floridablanca, Bucaramanga, Santander	
Tipo de vía:	
Autopista, Corredor primario	
Año de inicio de obra:	Año fin de obra:
2015	2016
Diseñador:	
Ingeniero Alfredo Santander Palacios	
Constructor:	
<p>Consortio Vial Puerta del Sol. Solarte Nacional de construcciones S.A.S (5%), Innova S.A.S (25%), Itac construcciones Ltda (10%), Asmi construcciones Ltda (9%), Constructora Valderrama Ltda (26%), VG Constructores S.A.S (12,5%) y Valco Constructores (12,5%),</p>	
Tipología:	
Puente viga-cajón construido por voladizos sucesivos	
Materiales:	

Longitud total:	Luces [m]:
220 [m]	53 - 111 - 56
Ancho del tablero:	Ancho viga-cajón:
22,50 [m]	17,20 [m]
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas:	Centro de luz:
6,00 [m]	2,50 [m]






Anotaciones:

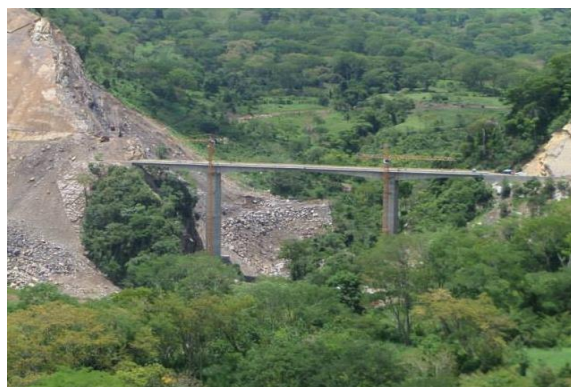
La sección transversal es una viga cajón de tres celdas

Ficha técnica	
Nombre:	
Puente Pujamanes	
Localización:	
Tramo de la vía Lisboa - La Canana entre las abscisas K10+761,05 y K11+004,05	
Tipo de vía:	
Vía Secundaria Sustitutia Bucaramanga - San Vicente de Chucurí	
Año de inicio de obra:	Año fin de obra:
2012	2014
Diseñador:	
INGETEC	
Constructor:	
CONALVÍAS CONSTRUCCIONES	
Tipología:	
Viga-cajón por Voladizos Sucesivos	
Materiales:	
Concreto Clase A $f_c = 35$ Mpa, Acero de refuerzo Gr 60 y Acero para postensado Gr 270	
Longitud total:	Luces [m]:
244 [m]	60,5 - 122 - 60,5
Ancho del tablero:	Ancho viga-cajón:
11,50 [m]	
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas:	Centro de luz:
6,70 [m]	3,05 [m]
Anotaciones:	

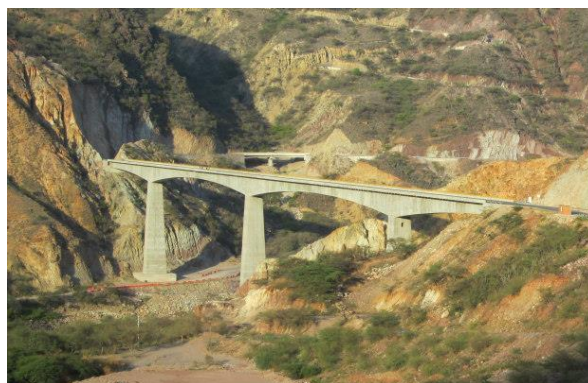


Ficha técnica	
Nombre: Puente El Tablazo	
Localización: Tramo de la vía Lisboa - La Canana entre las abscisas K15+356,30 y K15+918,15	
Tipo de vía: Vía Secundaria Sustitutia Bucaramanga - San Vicente de Chucurí	
Año de inicio de obra: 2012	Año fin de obra: 2014
Diseñador: INGETEC	
Constructor: CONALVÍAS CONSTRUCCIONES	
Tipología: Viga-cajón por Voladizos Sucesivos	
Materiales: Concreto Clase A $f_c = 35$ Mpa, Acero de refuerzo Gr 60 y Acero para postensado Gr 270	
Longitud total: 560 [m]	Luces [m]: 80,25 - 160 - 80,25
Ancho del tablero: 11,50 [m]	Ancho viga-cajón:
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas: 8,80 [m]	Centro de luz: 4,00 [m]
Anotaciones:	
  	

Ficha técnica	
Nombre:	
Puente El Ramo	
Localización:	
Tramo de la vía Lisboa - La Canana entre las abscisas K22+203,10 y K22+382,10	
Tipo de vía:	
Vía Secundaria Sustitutia Bucaramanga - San Vicente de Chucurí	
Año de inicio de obra:	Año fin de obra:
2012	2014
Diseñador:	
INGETEC	
Constructor:	
CONALVÍAS CONSTRUCCIONES	
Tipología:	
Viga-cajón por Voladizos Sucesivos	
Materiales:	
Concreto Clase A $f_c = 35$ Mpa, Acero de refuerzo Gr 60 y Acero para postensado Gr 270	
Longitud total:	Luces [m]:
180 [m]	44,5 - 90 - 44,5
Ancho del tablero:	Ancho viga-cajón:
11,50 [m]	
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas:	Centro de luz:
4,95 [m]	1,80 [m]
Anotaciones:	



Ficha técnica	
Nombre: Puente Guillermo Gómez Ortiz	
Localización: Vía Bucaramanga Zapatoca	
Tipo de vía: Vía secundaria	
Año de inicio de obra: 2012	Año fin de obra: 2014
Diseñador: INGETEC	
Constructor: Consorcio AZVI-CONSTRUIRTE	
Tipología: Viga-cajón por Voladizos Sucesivos	
Materiales: Concreto Clase A $f_c = 35$ Mpa, Acero de refuerzo Gr 60 y Acero para postensado Gr 270	
Longitud total: 510 [m]	Luces [m]: 80-160-160-80-30
Ancho del tablero: 10,55 [m]	Ancho viga-cajón: 5,10 [m]
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas: 8,80 [m]	Centro de luz: 5,10 [m]
Anotaciones:	



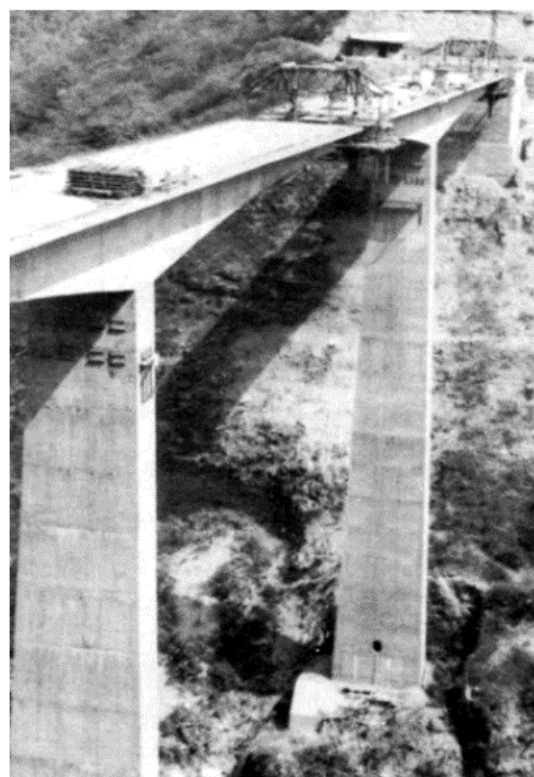
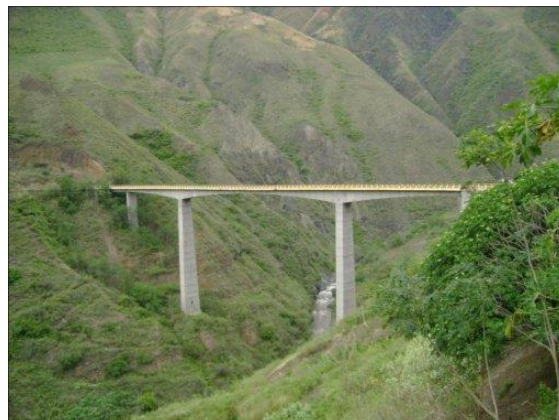
Ficha técnica	
Nombre: Puente Geo Von Lengerke	
Localización: Vía que comunica Betulia con Girón entre las abscisas K0+201,86 y K0+592,9 Sobre río Somagoso.	
Tipo de vía: Vía secundaria	
Año de inicio de obra: 2012	Año fin de obra: Marzo 2014
Diseñador: _____	
Constructor: COPSISA	
Tipología: Tres vanos viga-cajón por voladizos sucesivos y dos vanos por tablero y vigas postensadas.	
Materiales: Concreto Clase A $f_c = 35$ Mpa, Acero de refuerzo Gr 60 y Acero para postensado Gr 270	
Longitud total: 309,64 m	Luces [m]: 77 - 155 - 77,64
Ancho del tablero: 6,55 [m]	Ancho viga-cajón: 3,45 [m]
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas: 7,75 [m]	Centro de luz: 3,0 [m]
Anotaciones: El puente estará conformado por 309,64 m de superestructura construida en voladizos sucesivos con tres luces de 77,0 m, 155,0 m, 77,64 m y dos luces de 40,97 m y 40,43 por tablero y vigas postensadas.	




Ficha técnica	
Nombre: Puente Guillermo Gaviria (Yondo)	
Localización: Estrecho de Galán, Km 661 del río Magdalena, unos 6 Km aguas abajo del Puerto de Barrancabermeja y de la Refinería de Ecopetrol.	
Tipo de vía: Vía	
Año de inicio de obra: 2004	Año fin de obra: 2006
Diseñador: Darío Farías y Cía.	
Constructor: Concreto S.A	
Tipología: Viga-cajón voladizos sucesivos con dovelas fundidas in situ y viaductos de acceso estuvieron conformados por luces de vigas postensadas y placa en concreto.	
Materiales: Concreto de 42 Mpa	
Longitud total: 400 [m] (929)	Luces [m]: 100-200-100
Ancho del tablero: 11 [m]	Ancho viga-cajón: 6 [m]
Altura de la sección transversal: Sobre pilas: 9,50 [m]	
Centro de luz: 2,80 [m]	
Anotaciones: de 40 metros conformadas por tres vigas postensadas y una placa, soportadas en columnas apoyadas sobre fundaciones erigidas sobre pilotes preexcavados. ES EL PUENTE DE MAYOR LUZ CONSTRUIDO EN EL PAÍS CON EL SISTEMA DE VOLADIZOS SUCESIVOS.	



Ficha técnica	
Nombre: Puente Juanambu	
Localización: vía panamericana entre las ciudades de Pasto y Popayán, Carretera Tamaringo-Pasto sobre el río Juanambú	
Tipo de vía: Vía Primaria	
Año de inicio de obra: 1973	Año fin de obra: 1975
Diseñador: José A. Torroja, Oficina Técnica	
Constructor: Estructuras Pretensadas Ltda.	
Tipología: Puente Viga-cajón en Voladizos Sucesivos	
Materiales: Concreto 35 MPa, Acero reforzado y Acero	
Longitud total: 180 [m]	Luces [m]: 45 - 90 - 45
Ancho del tablero: 8,90 [m]	Ancho viga-cajón: 5 [m]
Altura de la sección transversal:	
Sobre pilas: 4,82 [m]	Centro de luz: 1,82 [m]
Anotaciones: El puente sobre el río Juanambú es considerado como el primer viaducto construido en el país por el sistema de voladizos sucesivos, utilizando el sistema de pos-tensado y destacándose en su momento con el Premio Nacional de Ingeniería	



**ANEXO 2. ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE
PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN
COLOMBIA**

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 108 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017



ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA

a) RESUMEN DE LA PROPUESTA

El buen comportamiento estructural (gran rigidez a flexión y torsión) de los puentes viga-cajón, las ventajas en su construcción, sus formas estéticas, el fácil mantenimiento y el bajo costo de los materiales, además de cubrir grandes luces, hacen de estos una de las tipologías más utilizadas en Colombia; incluso al poder ser apoyado en pilares únicos, esto facilita su construcción en zonas de aguas profundas o regiones montañosas de grandes alturas, lo cual se adecua muy bien a la topografía, relieve y necesidades del país. [1]

El aumento del volumen y tamaño de los vehículos que transitan por los corredores viales ha causado que los puentes se vean superados o llevados a los límites para los que fueron originalmente diseñados. [2] El deterioro de los puentes existentes se ha convertido en una preocupación tanto a nivel técnico como económico en todo el mundo, por esta razón, es importante realizar un monitoreo de los mismos y crear estrategias para que los costos de estas operaciones disminuyan y sobre todo para poder mantener la estructura en servicio, ya que estos grades puentes forman parte de corredores viales que son de gran importancia para el país y por lo tanto su continuo funcionamiento debe ser una prioridad para delimitar no solo el impacto económico sino también el impacto social que el cierre de estas superestructuras puede acarrear. [2] [3] [4] [5]

El objetivo de la investigación es identificar las patologías estructurales más recurrentes que se presentan en los puentes viga-cajón con el fin de prevenir el deterioro a largo plazo de estas estructuras en Colombia y contar con soluciones incluso antes de que dichas patologías se manifiesten, ya que solo en los últimos años


 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 109 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

los puentes de esta tipología han tenido un auge en el país y por lo tanto no tienen la antigüedad suficiente para presentar este tipo de problemas, especialmente como grandes deflexiones.

Como fase inicial se realizará un estudio bibliográfico riguroso con el objeto de identificar patologías registradas en la literatura internacional a lo largo del tiempo en los puentes viga-cajón, además de las técnicas y tratamientos utilizados con éxito para la reparación, mantenimiento, rehabilitación y recuperación de dichas estructuras. También, se generará una base de datos local (Santander) y nacional (Colombia) de los puentes existentes de la tipología en estudio.

Posteriormente, mediante el modelamiento numérico por elementos finitos se realizará el estudio de dos puentes representativos escogidos con el fin de identificar si pueden llegar a presentar las patologías mencionadas. A su vez, se realizarán visitas de inspección a una muestra de los puentes viga-cajón en el país, que tengan una antigüedad mayor a 10 años y así identificar si ya evidencian algún proceso patológico. A partir de este punto, iniciara el análisis de los resultados tanto del modelamiento como de las visitas de inspección. Como producto final de la investigación se busca la elaboración de un manual que contenga todos los lineamientos para el correcto tratamiento que estas superestructuras requieren para mejorar su vida de servicio. Para esta investigación de espera vincular a las entidades nacionales encargadas de la construcción y mantenimiento de la infraestructura vial (Agencia nacional de infraestructura ANI, el Instituto Nacional de Infraestructura INVIAS y concesiones viales).

Palabras clave: puentes, concreto, viga-cajón, voladizos sucesivos, patologías, deflexiones excesivas.

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 110 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

b) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En algunos países donde los puentes viga-cajón han tenido un uso muy extensivo, se han observado problemas de deflexiones y deformaciones excesivas a largo plazo (más de 20 años), llevando en algunas ocasiones al cierre o colapso de estas estructuras. En Colombia, ha habido una gran auge y crecimiento del número de puentes de dicha patología y por lo tanto con este estudio se busca contar previamente con soluciones y medidas que no permitan que los puentes nacionales presenten daños irreparables con enormes pérdidas económicas y gran impacto social.


Por lo tanto, nuestra pregunta de investigación es:

¿Es posible que los puentes viga-cajón de grandes luces en Colombia manifiesten en el largo plazo patologías similares a las que se han manifestado en esta tipología de puentes en países donde su uso viene de tiempo atrás?

c) JUSTIFICACIÓN

Los puentes son estructuras que tienen como función “salvar” obstáculos impuestos por la naturaleza, como ríos, valles y lagos; y al mismo tiempo aquellos que han sido creados por el hombre o artificiales, como las carreteras. [6] La topografía de Colombia, es un gran escenario que obliga a los ingenieros y diseñadores a encontrar soluciones de gran escala que permitan el desarrollo de la infraestructura del país, por ejemplo, si se quieren construir carreteras de alta velocidad en paisajes montañosos el uso de mega-estructuras, como los puentes viga-cajón, es fundamental para llevar a cabo esta tarea de la manera más eficiente.

Esta razón, sumada al aumento del volumen de tráfico y de vehículos pesados en las carreteras del país originado por el crecimiento del comercio, la industria y la



	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 111 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

seguridad, ha propiciado el auge de la construcción de la tipología en estudio, ya que, al estar apoyados en pilares únicos, esto facilita su construcción en zonas de aguas profundas o regiones montañosas de grandes alturas, lo cual se adecua muy bien a la topografía, relieve y necesidades del país, como ya se mencionó anteriormente. [1]

El aumento del volumen y tamaño de los vehículos que transitan por los corredores viales ha causado que los puentes se vean superados o llevados a los límites para los que fueron originalmente diseñados. [2] El rápido deterioro de los puentes existentes se ha convertido en una preocupación tanto a nivel técnico como económico en todo el mundo, ya que la reparación de un puente es mucho más costosa que un mantenimiento constante y preventivo. [3]

Es importante realizar un monitoreo de los puentes existentes y crear estrategias para que los costos de estas operaciones disminuyan, permitiendo la reparación de las estructuras antes de que sea más económico construir un nuevo puente que la reparación del mismo y sobre todo para poder mantener la estructura en servicio, ya que estos grades puentes normalmente forman parte de corredores viales que son de gran importancia para el país y por lo tanto su continuo funcionamiento debe ser una prioridad para delimitar no solo el impacto económico sino también el impacto social que el cierre de estas superestructuras puede acarrear. [2] [3] [4] [5]

En Colombia, tradicionalmente el diseño de puentes se realizaba siguiendo las recomendaciones de la norma AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), pero actualmente existe la norma colombiana de diseño de puentes que regula el diseño y construcción de estas estructuras en el país. Este código fue creado por las diferentes necesidades propias del país, como: las condiciones de sismicidad, el aumento de vehículos pesados por las carreteras del país y la posible intervención de empresas extranjeras que necesitaban ser reguladas.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 112 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

En el año 1996 el Instituto Nacional de Infraestructura INVIAS implementó, con la supervisión del Directorado de Carreteras de Dinamarca, el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL, cuyo alcance, contenido y funciones están presentadas en nueve volúmenes, en la Ficha Técnica de información de SIPUCOL y otros documentos de soporte. Este sistema se encarga del inventario, monitoreo, mantenimiento y reparación de la red de puentes presentes en el país. Pero las patologías y tratamiento que abarca este sistema están orientadas al pavimento de los puentes mas no de su sistema estructural como tal. [7] [8]

A pesar de la existencia del SIPUCOL, en Colombia se debe tener un enfoque y control más específico hacia los puentes de concreto ya que solo estos representan el 87% del total de puentes en el país y de estos el 21% son en concreto presforzado, clasificación de incluye a los viga-cajón (Figura 1). [9] En esta línea de ideas, el objetivo final de la investigación, además de determinar las patologías y posibles tratamientos más adecuados a los puentes viga-cajón en Colombia, es construir una propuesta de manual propia del país donde se estipulen procedimientos claros de inspección, patologías y manifestaciones, técnicas y tratamientos para la reparación, incluso preventiva, de dicha tipología, tomando como base algunos documentos de este tipo que ya existen en otro paisas, como los catálogos producidos por el DTecITM (antiguo Sétra) en Francia. Varios de estos documentos están enfocados en el diseño, inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación de los puentes viga-cajón en concreto presforzado construidos por el método de los voladizos sucesivos, ya que esta tipología es la más extendida en Francia y el continente europeo. [10] [11]

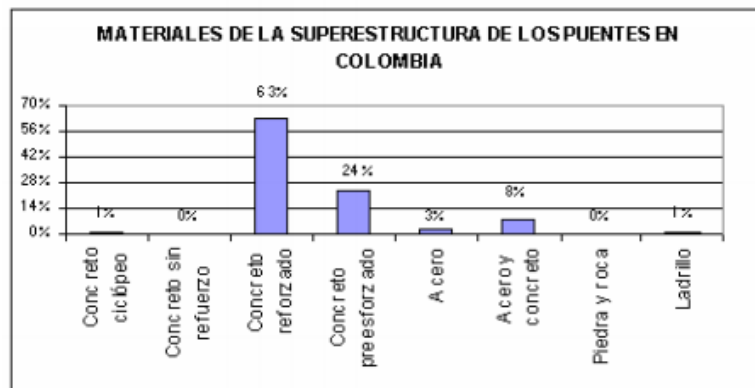




Figura 29. Distribución de los materiales principales de la superestructura. Tomado de [12]

Teniendo en cuentas los antecedentes y el comportamiento presentado por los viga-cajón registrado en la literatura científica internacional, la mayor preocupación se enfoca hacia las grandes deformaciones que muchos de estos puentes han presentada a largo plazo (en promedio 20 años), cuya causa se ha atribuido a la acción de los llamados efectos diferidos en el tiempo: el creep, el shrinkage y la relajación del acero. [1] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]

En Colombia el auge de estos puentes es muy reciente y como consecuencia la gran mayoría de estas mega estructuras no presentan aun la antigüedad para presentar las deformaciones excesivas de largo plazo, lo que se quiere con esta investigación es analizar las probabilidades de que los puentes colombianos presenten el mismo comportamiento de los puentes en otro países y llegado caso crear estrategias de identificación de los problemas y prevención, para que el país esté preparado y no se convierte en un problema que lleve a cierres o colapsos en la infraestructura del país que se traduce en grandes impactos económicos y sociales.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 114 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

d) OBJETIVOS

General



- Determinar la probabilidad de existencia de patologías por efectos reológicos a largo plazo en puentes viga-cajón de grandes luces en Colombia.

Específicos

- Identificar según literatura científica las patologías estructurales más recurrentes que los puentes viga-cajón han presentado en países donde dicha tipología se ha utilizado desde hace varias décadas.
- Tomar dos puentes representativos colombianos, realizar su modelamiento por elementos finitos con el fin de determinar si presentarán las patologías identificadas.
- Realizar inspecciones de campo de una muestra de los puentes que se identifiquen en el país con una antigüedad mayor a 10 años para evaluar si ya han iniciado un proceso patológico.
- Construir un Manual que de los lineamientos para la inspección, mantenimiento, reforzamiento, reparación y rehabilitación de los puentes viga-cajón en Colombia.

e) MARCO TEÓRICO

Los puentes viga-cajón en Colombia construidos por el método de los voladizos sucesivos, como ya se mencionó anteriormente, han tenido un gran auge en los últimos años en el país y al ser estas estructuras relativamente nuevas no se ha prestado la atención suficiente a las distintas patologías que presenta esta tipología de puentes con el paso de los años y su uso continuo. Esta puede ser la causa de que en Colombia hoy en día no exista un manual o código que ayude y guíe a la identificación y solución de los problemas presentados por dicha tipología de puentes,



 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 115 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

sobre todo de aquellos fenómenos como las deformaciones excesivas causadas por efectos diferidos que al no ser tenidos en cuenta en el diseño pueden incluso dejar fuera de servicio a la superestructura. La necesidad de establecer un programa de mantenimiento para este tipo de puentes debe ser una prioridad ya que estas estructuras conectan las principales vías que articulan el país y si se permite su colapso, ya sea solo parcial, las pérdidas económicas pueden ser muy representativas, máxime considerando el gran número de estos que están siendo construidos dentro del programa de concesiones viales del país.

El deterioro en los puentes ocurre por una variedad de factores patológicos que se pueden originar por fenómenos como; cargas de tráfico inesperadas, aumento del volumen de tráfico, impacto de vehículos, condiciones del medio ambiente, movimientos de tierra, baja calidad de los materiales en construcción, efectos del cloro y carbonatación, falta de mantenimiento, deterioro del sistema de drenaje, baja calidad del pavimento o por los efectos diferidos, que a pesar de ser tenidos en cuenta en el diseño siguen siendo la causa de grandes deformaciones tardías en la estructura. [3]

Existe una gran variedad de defectos que pueden presentarse en este tipo de puentes, tanto en la superestructura como en la infraestructura, para comenzar a presentar algunas de estas patologías se listan a continuación los defectos encontrados en un estudio realizado en un tramo de 1000 km (alrededor de 300 puentes) en el corredor vial del distrito occidental de Grecia: [22]

- Erosión y socavación tanto del lecho del río como de la fundación del puente.
- Agrietamiento y desintegración de la losa del tablero.
- Corrosión de las barras de refuerzo debido a la contaminación y carbonatación.
- Daños en las juntas de dilatación de la losa debido a tráfico pesado.
- Daño o desplazamiento y cambios de las condiciones de apoyo.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 116 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

- Deterioro de la capa asfáltica (agrietamiento, distorsión de la superficie, desintegración)
- Daño de las barreras de protección debido a colisiones.
- Deterioro por humedad.
- Fallo del sistema de drenaje de la losa.


Todos los daños no estarán en el foco central de este documento, pero deben ser nombrados y tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio completo del estado del puente. [23] [24]

1.1. Patologías y problemas propios de la tipología en estudio

1.1.1. Efectos diferidos en los elementos de concreto pretensado

Los desastres y pérdidas de servicio de las diferentes estructuras siempre han sido y serán una manera de progresar y acelerar la búsqueda de soluciones en la ingeniería estructural. Durante años el comportamiento y deflexiones a largo plazo de los puentes viga-cajón de grandes luces han sido monitoreados, los pequeños valores de deflexión presentados durante los primeros años de servicio de la estructura hacen que los ingenieros realicen curvas de predicción totalmente optimistas y por lo tanto se sientan sorprendidos cuando las deflexiones se aceleran después de varios años. Al no tener conocimientos claro de que puede estar causando esa aceleración en la deformación de la estructura, las medidas correctivas aplicadas pueden ser incluso más perjudiciales ya que pueden aumentar los momentos flectores, sobrecargar el puente y posiblemente llevarlo al colapso con un alto nivel de daños. [13] [25]

En el caso del puente Koror-Babeldaob (figura 11.a), que cruza el canal Taegel en la República de Palaos y que en el momento de su finalización en 1977 fue, con 241 m de luz, record de los puentes viga-cajón construidos por voladizos sucesivos. Fenómenos como los efectos diferidos; la retracción (Shrinkage) y el flujo plástico (creep), llevaron a este puente al colapso en 1996. A los 18 años de su construcción la deflexión del puente era de 1,61 m y siguió aumentando hasta el momento de su


	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 117 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017

colapso en 1996 causado por un proceso de pretensado correctivo que se inició, pero luego se retrasó alrededor de tres meses. [13]

Cuando se quieren conocer las causas de las fracturas del concreto es importante centrarse en sus propiedades mecánicas cuando el material está sometido a tensión y aún más en aquellas que solo se manifiestan con el paso de largos periodos de tiempo. El estudio de dichos fenómenos viene desde inicios del siglo XX, cuando hombres como Freyssinet (1912) y Hatt (1907) descubrieron el flujo plástico (creep) del concreto. [25]

Los efectos diferidos son una de las principales desventajas del concreto ya que representan cambios volumétricos difíciles de predecir, además de que afectan la actuación del acero a lo largo del tiempo de servicio en la estructura. Estos efectos pueden subdividirse en una parte que es independiente de las cargas llamada *shrinkage* o retracción y en otra que si depende de las cargas conocida como el *creep* o flujo plástico. El primero también se conoce como retracción de fragua y se define como la fluencia y retracción del concreto por el gradiente de humedad que se presenta entre el material y el medio donde este se encuentra, es decir, depende de la humedad del ambiente, la temperatura y el material. La retracción se puede dar incluso cuando la estructura no se encuentra sometido a ninguna carga y puede ser originada por causas físicas (temperatura) o químicas (efectos de hidratación). [25] [26] [20] [21]

Además, el *shrinkage* es un proceso que aumenta a medida que la estructura presente más grietas ya que estas la hacen más vulnerable y expuesta al agua, temperatura y al ambiente en general, por lo tanto, a mayor es el número de grietas más aumenta en el tiempo la retracción. Este fenómeno también se produce cuando el agua se desplaza por capilaridad hacia grietas creadas recientemente o por el consumo de agua de los agregados anhidridos. [25]

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 118 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017


La retracción trae consecuencias severas en la estructura que idealmente deben ser controladas desde el diseño, estas son:

4. El agrietamiento de los elementos si el fenómeno de retracción se restringe.
5. Cambios en el volumen del concreto, lo cual genera movimientos en la estructura y por lo tanto afecta el valor de las deflexiones.
6. Perdida de los esfuerzos iniciales de los elementos presforzados.

El flujo plástico (creep) es la deformación lenta y a lo largo del tiempo de un material generalmente sometido a una carga constante, el material presenta una deformación no lineal y varia con la composición y propiedades del concreto, es diferente de la deformación instantánea que ocurre al momento de que la estructura recibe la carga. Este fenómeno depende tanto de la retracción del concreto como la relajación y perdida de tensión del acero y entre sus consecuencias negativas para la estructura se encuentran: [21] [26] [37]

6. Aumento en las deflexiones en el tiempo; la estructura presenta mayores deflexiones de las que se proyectan en el diseño.
7. Redistribución de los esfuerzos internos de la estructura.
8. Aumento del esfuerzo a compresión en el acero.
9. Perdida de los esfuerzos iniciales de los elementos presforzados.
10. Valores de acortamientos distintos en los elementos estructurales lo que genera esfuerzos adicionales que no han sido tenido en cuenta y por lo tanto son perjudiciales para el correcto funcionamiento del puente.

Adicionalmente tanto el flujo plástico como la retracción causan perdida de tensionamiento en los torones del sistema de pretensado del puente. El *creep* cuando la humedad y la temperatura son constantes es llamado *basic creep*. Cuando en el *creep* se tiene en cuenta tanto el shrinkage, que depende fuertemente de la geometría, humedad y temperatura, como el *basic creep* se conoce como efecto Pickett, *drying*

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 119 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017

creep o *flujo plástico de secado*. Este último consiste está definido como el exceso de *creep* durante el secado sobre la suma del *shrinkage* y *el basic creep*. [26] [20] [28]

El esfuerzo total en las estructuras de concreto en cualquier momento de su vida es la combinación de sus esfuerzos elásticos iniciales, el *shrinkage* y el *creep*. En la figura 10, se observa el comportamiento de estos esfuerzos a lo largo del tiempo en estructuras bajo cargas de muy larga duración. El *drying creep* depende de la temperatura del ambiente y la humedad, mientras que el *basic creep* depende de las propiedades mecánica y los componentes. Estos fenómenos son aún más relevantes en estructuras de concreto de gran escala, como es el caso de los puentes viga-cajón, los efectos diferidos en este caso toman mayor relevancia como causa de agrietamiento, deformación estructural, fuerzas de pre-esfuerzo y otros daños en la estructura. [21] [27]

El *creep* en el concreto se puede presentar tanto a tensión como a compresión, este último ha sido estudiado más ampliamente ya que los ensayos necesarios son sencillos de realizar y no presenta dificultades en la toma de datos debido al bueno comportamiento estructural que presenta el concreto bajo esta condición, pero este tipo de flujo plástico a compresión está más relacionado a efectos en la edad temprana del hormigón. Por el otro lado, el *creep* en tensión presenta diversas dificultades ya que realizar ensayos de tracción al material arroja valores tan pequeños antes de fracturarse que la mayoría de dispositivos de medición no tienen capacidad de leer dichos resultados. [25]

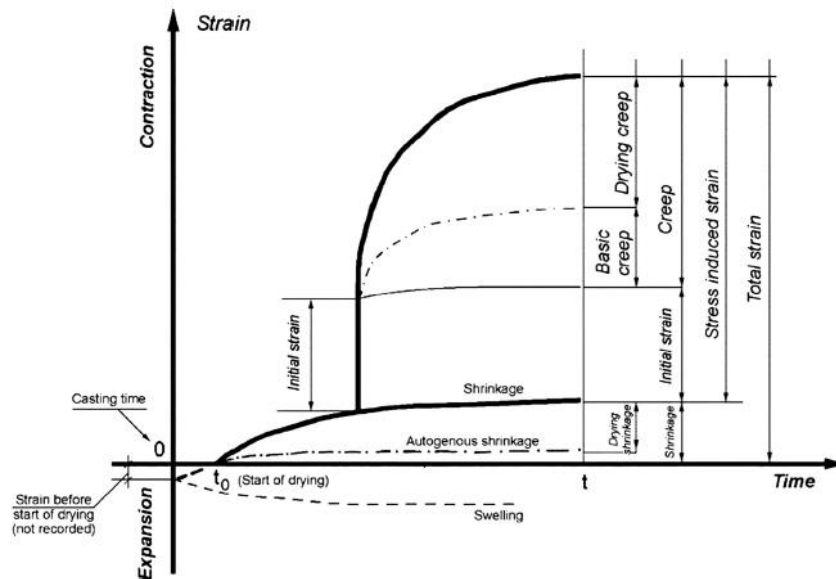


Figura 30. Componentes del esfuerzo del concreto bajo cargas de larga duración. [27]

Uno de los efectos que se subestimó en el diseño y concepción del puente en Palaos fue el flujo plástico (creep). Solamente por efecto del *creep* y *shrinkage* durante la construcción del puente se presentó una deflexión adicional inicial de 22 cm, cuando la deflexión total en el puente estaba estimada para valores entre 71 a 76 cm. Estos efectos se observaron sobre todo durante la construcción de las dovelas, ya que al momento del cierre de los voladizos se contaba con una deflexión de 7,5 cm cuando se había calculado que el camber o la contraflecha (deflexión inicial cóncava que se le da a este tipo de estructuras por la deformación que se dan después del desencofrado y se contrarrestan los efectos de la carga) debía tener un valor de -30 cm. [13]

En 1996 se inició un proceso de pretensado correctivo, pero una demora de tres meses de la obra de rehabilitación causó finalmente el colapso total (figura 11.b) del puente el 26 de septiembre del mismo año, cuya consecuencia fueron dos muertes y muchos heridos además del cierre y pérdida de servicio de la estructura.





 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 121 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017



Figura 31. (a) Puente de Koror-Babeldaob en Palaos en 1977; (b) Vista lateral del puente después de su colapso en 1996. [13]

Otro fenómeno que influyó en el aumento excesivo de las deflexiones en el caso del puente en Palaos fue la relajación del acero. Este fenómeno visco plástico se ve fuertemente afectado por las altas temperaturas; la república de Palaos se ubica en el océano pacífico occidental y tiene un clima tropical con temperaturas medias anuales de 28°. El calentamiento de la losa superior producido por el sol tropical debió haber intensificado significativamente la relajación del acero y por lo tanto influyó en las deflexiones excesivas presentadas. Por otro lado, factores como la humedad o los cambios de temperatura fuertes por estaciones no afectaron en gran medida el comportamiento del concreto en este caso por la ubicación del mismo, pero en lugares con estaciones los efectos de grandes cambios de temperatura deben ser tenidos en cuenta. [13]


Pero el calentamiento de la placa superior debido al sol no solo afecta al acero, la sección típica de los puentes viga-cajón consta de una placa superior de espesor constante (aproximadamente 200 mm) y una losa inferior cuyo espesor normalmente es variable (alrededor de 200 mm en el centro de luz y 1 m sobre las pilas). Para una losa de concreto la velocidad de secado, por lo tanto, también la velocidad de retracción y flujo plástico de secado, es aproximadamente inversamente proporcional al cuadrado de su grosor y las diferencias de temperatura y humedad que se presentan entre sus dos superficies es un factor importante. Este fenómeno ocasiona

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 122 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

que el *creep* y *shrinkage* sean variables a medida que varía la sección transversal, incluso es diferente entre las dos losas al ser estas de espesores distintos, pero esto representa una mayor dificultad a la hora del cálculo y modelamiento de la deflexión de la estructura por lo cual normalmente se asume como constante causando errores notables. Según Bažant la causa principal de las deflexiones excesivas está en el gran diferencial entre los valores de retracción entre la losa superior en inferior causado por la diferencia de los espesores entre las losas. [19]

Una problemática más que se presentó fue la pérdida de tensionamiento de los cables del pretensado, en el caso específico del puente de Palaos, a los 19 años de servicio en el momento en que se iba a realizar la rehabilitación de los tendones la pérdida de pre tensionamiento era de un 50%, que comparada con el 22% que se calculó en el momento de la concepción de la estructura, por medio de las formulas de la teoría de la viga simplemente apoyada, es bastante mayor. Esta situación lleva a pensar que las teorías de diseño subestiman peligrosamente las deformaciones en el tiempo y por lo tanto la búsqueda e implementación de nuevos modelos es indispensable. En un análisis realizado por Kristek y Bažant se llegó a la conclusión que, al utilizar la teoría clásica para la flexión de las vigas, las deflexiones tardías se subestiman alrededor de un 20%. [1] [13]

En conclusión las principales causas de la subestimación de los efectos diferidos en este caso fueron: material pobre para el modelamiento del flujo plástico y la retracción, idealización de la estructura como viga simplemente apoyada en lugar de realizar un análisis 3D completo, diferencia en los valores de retracción y flujo plástico por el espesor variable de las losas de la sección transversal de las dovelas y, por último, la falta de una estimación estadística que mostrara las diferentes respuestas que podía presentar la estructura a través de los años. [13] [14] [16] [17]

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 123 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

Otra causa de las pérdidas de pre tensionamiento en los puentes de esta tipología es que la carga muerta comparada con la carga total es bastante considerable, a su vez, las propiedades reológicas del concreto y la relajación del acero de pretensado impactan en las deformaciones y en las pérdidas de tensionamiento. Existe registro de un gran número de estas estructuras que por causa de las deformaciones excesivas han tenido que cerrar o han sido reparadas antes de que la vida de servicio inicialmente asumida hubiera terminado, trayendo consecuencias que afectan severamente las comunidades que son usuarios y dependen en cualquier nivel del puente. [14]



Las consecuencias de permitir una deformación excesiva en la estructura van más allá, la redistribución de esfuerzos (un producto no deseado de las deformaciones inesperadas) puede desencadenar agrietamientos en el hormigón de los elementos estructurales acelerando procesos de corrosión en el acero de refuerzo y de pre-tensionamiento disminuyendo la seguridad del puente. Además, la redistribución de esfuerzos y el agrietamiento del hormigón reducirán aún más la resistencia de la estructura a las deflexiones excesivas convirtiéndose en un proceso cíclico y peligroso, lo cual hace vital que se inviertan grandes esfuerzos para mejorar la exactitud de las predicciones de las deformaciones tardías; el nivel de complejidad del análisis de las deflexiones aumenta aún más ya que los efectos diferidos: el flujo plástico, la retracción y la relajación de los esfuerzos influyen uno en el otro constantemente por lo tanto se debe realizar un análisis que los incluya en toda su magnitud. [1]

Otro factor que contribuye a la subestimación de este importante fenómeno es la pobre y poco realista estimación del valor de la asíntota que el *static creep* del concreto alcanza con el tiempo. [16]

Entender las razones de estas deformaciones excesivas es muy importante, ya que han sido causa de problemas en estructuras de este tipo alrededor de todo el mundo, algunas de estas estructuras no han manifestado grandes deformaciones sino hasta después de 30 años de servicio; el puente Urado en Japón es un ejemplo de esto y en la tabla 3 se presentan otros más. Además, al estudiar las distintas estructuras se puede por fin llegar a un modelo que realmente prediga el comportamiento de dichos puentes para poder establecerlo como una guía estándar, que represente una mayor seguridad y eficiencia, ya que los utilizados hasta ahora como el método de los elementos finitos, aunque incluyen los efectos diferidos, no son totalmente acertados en la predicción de sus implicaciones totales y realizan predicciones insatisfactorias que subestiman estos fenómenos dando como resultado predicciones poco realistas. [13]

Típicos puentes viga-cajon de grandes luces que han presentado problemas de deflexiones					
Name	Longitud de los vanos [m]	Pais	Tipo	Deflección	Años que tardo en manifestar problemas
Sanmen Gorge Yellow River Bridge	105 x 4 x 160 + 105	China	Marco rigido continuo	22 [cm]	10
Jiangjin Yangtze River Bridge	140 + 240 + 140	China	Marco rigido continuo	31.7 [cm]	-
Huangshi Yangtze River Bridge	162 + 3 x 245 + 162	China	Marco rigido continuo	30.5 [cm]	7
Humen Auxiliary Shipping Channel Bridge	150 + 270 + 150	China	Marco rigido continuo	26 [cm]	7
Parrotts Ferry Bridge	99 + 195 + 99	USA	Marco rigido continuo	63.5 [cm]	12
Koror-Babeldaob Bridge	72 + 241 + 72	Palua	Marco en T con una rotula	139 [cm]	18
Stovset Bridge	100 + 220 + 100	Noruega	Marco rigido continuo	20 [cm]	8
Stolman Bridge	94 + 301 + 72	Noruega	Marco rigido continuo	9.2 [cm]	3


Tabla 2. Típicos puentes viga-cajón de grandes luces que han presentado problemas de deflexiones. Adaptado de [15]

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 125 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

Algunas soluciones propuestas por Bažant (2012) en el diseño para minimizar las grandes deflexiones en el tiempo, que aunque son bien conocidas la mayoría de veces son ignoradas, son: evitar una articulación en el centro de luz, elegir un concreto con un bajo flujo plástico (creep) en el tiempo, dar al concreto más tiempo para ganar resistencia antes de aplicar el pres-fuerzo, incrementar el nivel de pretensado preferiblemente al punto de que la deflexión sea hacia arriba inicialmente, utilizar vigas más rígidas (con mayor altura) e instalar ductos vacíos para posibilitar la instalación de cables de pretensado adicionales si fuera necesario. Aunque el conocimiento de estas precauciones está bastante extendido, en la mayoría de casos son ignoradas, ya sea por falta de recursos o de conciencia. [14]

Otra de las razones por las cuales el estudio y predicción de la acción de los efectos diferidos y de la relajación del acero es tan complejo y difícil de predecir y modelar, es que tanto el flujo plástico como la retracción pueden ser variables tanto en el tiempo como a lo largo de la geometría de toda la estructura; es decir, al variar las propiedades del material en cada etapa de la construcción, la distribución de esfuerzos a lo largo de la estructura se ve afectada de manera variable. [14] Además, el hecho de que las viga-cajón tengan una sección transversal cerrada causa que factores como el shear lag effect, la torsión y la deformación distorsionada de la sección influyan a la hora de predecir el comportamiento a largo plazo de la estructura lo que deriva en un análisis más complejo que, por ejemplo, el utilizado para vigas rectangulares. [1]

Las deformaciones excesivas en los puentes no solo causan problemas estructurales también estéticos, ya que, aunque puede que el puente no colapse, una gran deflexión produce falta de confianza en los usuarios y por lo tanto no trasmite seguridad ni comodidad a la comunidad que dependa de su funcionamiento, lo cual es otra razón para garantizar que las deflexiones se limiten a las calculadas en el diseño. Daños en



	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 126 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

el pavimento y en los sistemas de drenajes también pueden ser el resultado de las deflexiones excesivas. [15] [16]

En las principales carreteras de Colombia existe un gran flujo de tráfico pesado, camiones de más de 10 toneladas. Dicha característica del país sumada al hecho de que la tendencia hoy en día es el diseño de grandes puentes con vidas de servicio más largas (hasta 100 años), crea la necesidad de no ignorar el efecto que el tráfico pesado tiene en el flujo estático cíclico del concreto. El efecto de un porcentaje de camiones pesados conduciendo en paralelo de manera repetitiva a lo largo de los años no debe ser subestimado a la hora de predecir el desarrollo de las deflexiones tardías y la redistribución de esfuerzos en la estructura. [16]

Como ya se mencionó anteriormente el uso de modelos simplificados en extremo y de fórmulas primitivas para el cálculo de los efectos diferidos en la estructura son otra gran fuente de inexactitud, por esta razón nuevos modelos más complejos, pero más cercanos a la realidad se han desarrollado recientemente; basados en estudios estadísticos hechos a largo plazo del *creep* y la retracción. Ejemplos de estos nuevos modelos son el modelo B3/B4 y el Model Code 10, que ya han sido probados para el cálculo de deflexiones dependientes del tiempo y sus resultados han sido más próximos a la realidad. Una característica común de estos nuevos modelos es que el *static creep* no se detiene con el tiempo bajo la acción de un esfuerzo constante, sino que en su lugar asumen que el crecimiento de este continúa, siguiendo una pendiente asintótica no nula en la escala a largo plazo. [16]



El desarrollo de modelos en tres dimensiones es, para el análisis del flujo plástico, de suprema importancia ya que este tipo de modelamiento permite el ensamble del comportamiento de la estructura bajo el flujo plástico dependiente del tiempo con otros procesos presentes en la estructura que pueden ser independientes de este (por

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 127 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

ejemplo: el agrietamiento, el ablandamiento (softening) y la fluencia plástica (cyclic creep) del concreto). Por desgracia la atención sobre la interacción de estos fenómenos es muy limitada actualmente y sus efectos en las deflexiones tardías y son ignorados ya que el foco se ha centrado únicamente en el comportamiento visco elástico desencadenado por el *static creep* del concreto. [16]

Sumado a lo anterior, los modelos que se han desarrollado a lo largo de los años para el modelamiento del flujo plástico y de la retracción son en su gran mayoría para concretos normales, pero actualmente los puentes de grandes luces son construidos con concretos de altas resistencias (proporcionando mayor durabilidad y resistencia a las estructuras) para los cuales es necesario ajustar y evaluar que tanto se ajustan los modelos existentes al comportamiento de estos concretos. Adicionalmente, la mayoría de estos modelos tampoco tienen en cuenta la influencia de los distintos rangos de acero presente en la estructura y se ha demostrado que este es un factor que también puede influir en los efectos diferidos en el tiempo, una mayor cantidad de refuerzo en el centro de luz y sobre las pilas puede ayudar a disminuir los efectos y por la tanto las deformaciones. [15]

A pesar de que los efectos diferidos y la relajación del acero son causas principales de las deformaciones tardías, también otra serie de aspectos son influyentes. Las variaciones de rigidez a lo largo de la estructura debido al agrietamiento, la redistribución de momentos que se origina, las propiedades mecánicas variables en toda la estructura, la pérdida de adherencia entre el acero de tensionamiento y el hormigón y los efectos del deterioro son algunos de estos aspectos. [14]

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 128 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017

f) METODOLOGÍA

1. Búsqueda bibliográfica



Se realizará una búsqueda y recopilación de literatura científica internacional relacionada con el comportamiento, inspección, patologías y tratamientos de recuperación, reparación, rehabilitación y mantenimiento de los puentes viga-cajón construidos por el método de los voladizos sucesivos. Se recopilarán catálogos, normas y manuales ya existentes en otros países, que poseen una mayor experiencia en el tema, con el fin de tener una guía y arrojar una luz más clara sobre el camino a seguir a la hora de proponer el manual.

También se estudiarán los distintos modelos utilizados a nivel internacional que han predicho de manera más exacta el comportamiento a largo plazo de los viga-cajón, ya que este es un punto clave a la hora del futuro modelamiento de los puentes del país.

2. Análisis y comparación de los parámetros de diseño

Con el fin de establecer la probabilidad de que los puentes colombianos construidos en el país se vean afectados por deformaciones excesivas a largo plazo, se realizará un análisis de los parámetros de diseños tanto de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP14 y CCP95) como de la norma AASHTO (rige el diseño en U.S.) y el Eurocode (rige el diseño en Unión Europea).

Lo anterior de realizar con el fin de comparar los parámetros de diseño y establecer si en Colombia se han tomado en cuenta las consideraciones necesarias para evitar los procesos de grandes deformaciones causadas por efectos diferidos durante el diseño de las estructuras.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 129 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN – VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

3. Clasificación e identificación de las patologías

Luego de recopilar toda la información disponible en la literatura científica, se realizará una clasificación de las patologías a las que se enfrentan esta tipología de puentes, haciendo énfasis especial en sus patologías estructurales particulares, como en los problemas y deflexiones excesivas a largo plazo causadas en estas estructuras por los efectos diferidos. Las patologías más generales relacionadas con los materiales y otros aspectos serán tenidas en cuenta como información complementaria.

4. Identificación y generación de bases de datos local (Santander) y nacional (Colombia).



En este punto se desea completar el inventario y fichas técnicas de todos los puentes de esta tipología que se encuentran tan en la red vial del departamento de Santander como de toda Colombia, esto con el fin de contar con una base de datos que ayude al control e inspección de los puentes.

5. Selección y obtención de información de puentes representativos.

Al contar ya con una base de datos completa, se realizará la selección de dos puentes representativos de la tipología en estudio basados en el tiempo de servicio, condiciones e importancia del puente, se profundizará acerca de los mismos.

6. Modelamiento de los puentes escogidos, por medio de elementos finitos (MIDAS).

Se realizará el modelamiento de los dos puentes escogidos en la etapa anterior. El análisis de los modelos se hará mediante elementos finitos, utilizando el software MIDAS, con el fin de determinar si a largo plazo estas estructuras pueden presentar las patologías estructurales encontradas y clasificadas con anterioridad, especialmente las deformaciones excesivas causadas por efectos diferidos. En lo posible, se debe realizar otro análisis de las estructuras por medio de uno de los modelos que han probado ser los más acertados a la hora de predecir los efectos diferidos y las deflexiones y comportamiento de los puentes viga-cajón a largo plazo.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 130 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

7. Visita de inspección a la muestra de puentes seleccionada. Puentes con antigüedad mayor a 10 años en el país.

Como las deformaciones excesivas suelen presentarse a largo plazo, en este punto se escogerán puentes que tengan una antigüedad mayor a 10 años en el país con el fin de realizar visitas de inspección para determinar si las deflexiones de los mismos ya evidencian la actuación de los efectos diferidos, además de estudiar la presencia de otras patologías estructurales.

8. Análisis de resultados y redacción de artículo de investigación.

Tanto los resultados obtenidos en el modelamiento de los puentes como aquellos que se recolectaron en las visitas de inspección se analizarán para hallar las conclusiones finales, para determinar el contenido de la propuesta del manual de inspección, elaborar el informe final y redactar un artículo de investigación que conllevaría a la elaboración de una propuesta de investigación aun mayor, que busca vincular entidades estatales como la Agencia Nacional de infraestructura ANI y el Instituto Nacional de Infraestructura INVIAS, para ser presentada a convocatorias de financiación externas (Colciencias, regalías, etc.).

9. Elaboración de una propuesta de manual para la inspección, mantenimiento y tratamiento de los puentes.



Con los resultados obtenidos y conclusiones establecidas tanto del modelamiento, como de las visitas de inspección y la búsqueda bibliográfica se realizará una primera propuesta de manual de mantenimiento, monitoreo, inspección, técnicas de reparación, rehabilitación y reforzamiento.

10. Elaboración del informe final, donde se muestran todos los resultados obtenidos.

Por último, en el informe final de la investigación se incluirán todos los resultados y conclusiones obtenidos.


g) CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	MESES																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a). Búsqueda bibliográfica.																								
b). Análisis y comparación de los parámetros de diseño																								
c). Clasificación e identificación de las patologías																								
d). Identificación y generación de bases de datos local (Santander) y nacional (Colombia).																								
e). Selección y obtención de información de puentes representativos.																								
f). Modelamiento de los puentes escogidos, por medio de elementos finitos (MIDAS)																								
g). Visita de inspección a la muestra de puentes seleccionada. Puentes con antigüedad mayor a 10 años en el país.																								
h). Análisis de resultados.																								
i). Elaboración de una propuesta de manual para la inspección, mantenimiento y tratamiento de los puentes.																								
j). Elaboración del informe final, donde se muestran todos los resultados obtenidos.																								

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 132 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN – VIE	Versión: 01 20 octubre 2017


h) RESULTADOS ESPERADOS

Producto	Resultado esperado	Indicador	Beneficiario	Medio de verificación
Vinculación estudiante de maestría	Inicio de la formación del estudiante de maestría en el marco del proyecto.	1	Por definir	<ul style="list-style-type: none"> - Certificado de participación del estudiante de maestría en la ejecución del proyecto, emitido por la autoridad en investigación de la institución ejecutora. - Resumen e informe técnico del trabajo realizado por el estudiante durante el periodo de vinculación al proyecto.
Formación estudiante de maestría	Formación culminada del estudiante de maestría en el marco del proyecto.	1	Por definir	<ul style="list-style-type: none"> - Documento de que el trabajo de grado realizado por el estudiante de maestría o un documento se hizo dentro de las actividades del proyecto o el acta de grado. - Contrato de vinculación del estudiante de maestría. - Copia de la tesis y productos de nuevo conocimiento generados durante el desarrollo del mismo, con los respectivos créditos a Colciencias incluyendo el código del proyecto. - Acta de sustentación y aprobación de la tesis de maestría.
Ponencia en evento científico nacional	Participación en eventos especializados, presentando los resultados de la investigación.	2	Investigadores participantes en el proyecto.	Certificado de participación como ponente y soporte del trabajo presentado (memorias y programa de los eventos). Presentación o poster con el debido reconocimiento a Colciencias.
Ponencia en evento científico internacional	Participación en eventos especializados, presentando los resultados de la investigación.	1	Investigadores participantes en el proyecto.	Certificado de participación como ponente y soporte del trabajo presentado (memorias y programa de los eventos). Presentación o poster con el debido reconocimiento a Colciencias.
Articulación de redes de conocimiento	Red creada o articulación en una red a nivel nacional o internacional.	1	Universidades y centros de investigación del SNCTel	Documento firmado por los respectivos directores de grupos de investigación reconocidos por Colciencias que involucre al menos 5 universidades participantes en la red temática de muros estructurales en concreto reforzado
Artículos	Artículos de investigación B y C.	2	Investigadores participantes en el proyecto.	*Artículos en revistas indexadas en categoría B y C, según clasificación Colciencias.

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 133 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

i) IMPACTOS ESPERADOS A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS

Impacto esperado	Plazo (años) después de finalizado el proyecto: corto (1-4), mediano (5-9), largo (10 o más)	Indicador verificable	Supuestos*
Divulgar el conocimiento producido desde los proyectos de pregrado.	corto	2 tesis de pregrado	Los estudiantes que se vinculen en el proyecto realizarán sus trabajos de grado con relación al proyecto.
Divulgar el conocimiento producido desde el grupo de investigación mediante ponencias y artículos.	corto	Artículos y ponencias	Se espera la publicación de artículos en revista indexada (B y C) y se presenten dos ponencias en congreso nacional. Y una en internacional.
Evidenciar la aparición de deflexiones excesivas en el largo plazo de puentes viga-cajón construidos por el método de los voladizos sucesivos.	mediano	Propuesta de manual.	Como resultado final se construirá la primera propuesta del manual que contenga los lineamientos para el correcto tratamiento de los viga-cajón.

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 134 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

j) CONFORMACIÓN Y TRAYECTORIA DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN


El grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción INME, inició sus actividades en el año de 1990 y desde entonces ha sido certificado por la Universidad Industrial de Santander y por COLCIENCIAS. Actualmente se encuentra clasificado en categoría “B”. Las líneas de investigación del grupo son: estructuras, gestión de la construcción, gestión y control de calidad en empresas de construcción y materiales de construcción. Los profesores de planta de la escuela de ingeniería civil adscritos al grupo son: ing. Civil- Ph.D Gustavo Chio Cho, ing. Civil- Ph.D Oscar Begambre, ing. Civil- Ph.D Álvaro Viviescas, ing. Civil- Ph.D Guillermo Mejía y ing. Civil- Ph.D Ricardo Cruz Hernández.

El grupo INME tiene por objetivo la búsqueda de nuevos materiales para la construcción, propender por una mejor utilización de los materiales tradicionales, y el estudio del comportamiento de las estructuras para edificaciones y obras de infraestructura en zonas de alta actividad sísmica. El grupo desarrolla evaluaciones de vulnerabilidad y resistencia proponiendo estructuras eficientes, económicas y seguras, utilizando nuevos materiales y tradicionales. El grupo servirá de apoyo al sector y a la industria de la construcción.

Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación en la temática del proyecto

Durante los últimos años, el grupo INME ha fortalecido sus conocimientos sobre el comportamiento de edificios de concreto reforzado de mediana y gran altura a través de trabajos de investigación a nivel de maestría y pregrado. Los trabajos realizados han sido los siguientes:

- Investigación y Desarrollo - *Título:* Estudios técnicos para determinar las posibles causas de colapso del puente el Tablazo en la vía la Renta San Vicente. Entidad Contratante: Gobernación de Santander. Director: Álvaro Viviescas.



	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 135 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017

MAESTRIA:

- Propuesta de plan de monitoreo del comportamiento dinámico para la salud estructural del nuevo puente Gómez Ortiz en la vía Girón Zapatoca. Autor: Laura Andrea Vargas Carvajal. Director: Álvaro Viviescas.
- Deflexiones a largo plazo en vigas de concreto reforzado. Autor: Iván Rafael Ochoa Rincón, Eliana Inés Guerrero Pulido. Director: Álvaro Viviescas.
- Evaluación del proceso constructivo en el comportamiento estructural de un puente construido por voladizos sucesivos. Autor: Diego Fernando Cetina Berdugo, Noel Enrique Ovalle Porras. Director: Gustavo Chio Cho.
- Detección de danos en puentes de tipología viga y losa simplemente apoyada usando redes neuronales. Autor: Rafael Eduardo Hani Martinez. Director: Gustavo Chio Cho.

PREGRADO:

- Evaluación del factor de seguridad en puentes de concreto existente. Autor: Deby Jurado Duarte. Director: Álvaro Viviescas.
- Evaluación de rigidez a flexión en puentes viga y losa en concreto pre-esforzado a partir de pruebas de carga. caso de estudio: puente el ramo, vía la renta-san Vicente de chucuri. Autor: Jorge Armando Mora Lozada. Director: Álvaro Viviescas.
- Evaluación del estado de servicio de puentes en vías secundarias de Santander. Autor: Oscar Leonardo Guerrero Ramírez. Director: Gustavo Chio Cho.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 136 de 129
		Versión: 01
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE		20 octubre 2017

Datos generales de los investigadores del grupo INME participantes en el proyecto

Nombre: **Álvaro Viviescas Jaimes**

CvLac:

http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001374357

Dependencia: Escuela de ingeniería civil

Vinculación: Profesor Asistente

Nombre: **Gustavo Chio Cho**

CvLac:

http://scienti1.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000078611

Dependencia: Escuela de ingeniería civil


Vinculación: Profesor Titular

Adicionalmente, como que quiere extender el impacto a nivel no solo de Santander sino a nivel nacional, se deben sumar esfuerzos para aprender de los caminos recorridos por otros investigadores. Por ello se propone incluir en el equipo a profesores reconocidos en el nivel investigativo de cara a contribuir de manera conjunta en resolver un problema que está relacionado directamente con el riesgo de pérdida de vidas humanas, económicas y sociales en el evento de un cierre parcial o total e incluso el colapso de los puentes viga-cajón en el país. Este equipo de apoyo estaría conformado por el siguiente grupo de profesores de planta. Se aprovecha aquí para presentar la justificación de la participación de cada uno de los investigadores invitados:

- Edison Osorio (Ing. Civil- Ph.D.), U. Antonio Nariño.

Grupo de Investigación: GRESIA

CvLac:

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 137 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01 20 octubre 2017

http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000313688

PREGRADO:

- Análisis del agrietamiento transversal en los tableros de los puentes con viga cajón de concreto reforzado en la ciudad de Bogotá D.C. Autor: Diego Alejandro Casallas Puerto. Director: Edison Osorio.

Otros investigadores vinculados:

- Carlos Alberto Riveros Jerez (Ing. Civil- Ph.D.),
Universidad de Antioquia

CvLac:

http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000722740



- José Matos (Ing. Civil- Ph.D.),
Universidad de Minho

k) BIBLIOGRAFÍA

[1] Guo, T., Chen, Z., Liu, T., & Han, D. (2016). Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. *Engineering Structures*, 117, 358-371.

[2] Miyamoto, A., Kawamura, K., & Nakamura, H. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(1), 45-55. Retrieved

[3] Santos, J., Nunes, C., Fernandes, C., & Varum, H. (2007). Common pathologies in RC bridge structures: A statistical analysis. Retrieved

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 138 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

[4] Miyamoto, A., Kawamura, K., & Nakamura, H. (2001). Development of a bridge management system for existing bridges. *Advances in Engineering Software*, 32, 821-833.

[5] Park, S., Stubbs, N., Bolton, R., Choi, S., & Sikorsky, C. (2001). Field verification of the damage index method in a concrete box-girder bridge via visual inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16(1), 58-70.

[6] Gerardino, M. (2011). Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos Sucesivos (Doctoral dissertation, Tesis de Master Universidad Politécnica de Cataluña)


[7] Resolución N°1528. Por la cual se implementa el Sistema de Administración de Puentes de Colombia SIPUCOL de la Red Vial Nacional, la Ficha Técnica de Información de SIPUCOL y se dictan otras disposiciones, Colombia, 23 de mayo de 2017.

[8] SIPUCOL, Sistema de Puentes de Colombia. Ministerio de Transporte, Colombia. Ministerio de Transporte de Dinamarca, Instituto Nacional de Vías, Dirección de Carreteras. Manual de usuario, Generalidades. 1997.

[9] García Giraldo, J. M., Ospina Giraldo, J., & Graciano Gómez, E. A. (2014). La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia. *Revista EIA*, 11(22), 119-131.

[10] CEREMA, La Direction technique Infrastructures de transports et matériaux (DTecITM) - ex Sétra. Available: <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/la-direction-technique-infrastructures-de-r1147.html>. [Citado agosto 2017]

[11] What is the Cerema? Available: <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/what-is-the-cerema-a5938.html>. [Citado agosto 2017]

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 139 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

[12] Muñoz, E.E., Valbuena, E.A., y Hernández, R. (2004). “Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional, basados en inspecciones principales”, II Jornadas de Ingeniería Civil en Cuba, Santiago de Cuba.

[13] Bažant, Z. P., Yu, Q., & Guang-Hua Li. (2012). Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: Record-span bridge in palau and other paradigms. Journal of Structural Engineering, 138(6), 676-686.

[14] Bažant, Z.,k P., Yu, Q., & Li, G. (2012). Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: Numerical analysis and lessons learned. Journal of Structural Engineering, 138(6), 687.


[15] Pan, Z., Lu, Z., & Fu, C. C. (2011). Experimental study on creep and shrinkage of high strength plain concrete and reinforced concrete. Advances in Structural Engineering, 14(2), 235-247.

[16] Tong, T., Liu, Z., Zhang, J., & Yu, Q. (2016). Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage, static creep and traffic-induced cyclic creep. Engineering Structures, 127, 510-524.

[17] Kamatchi, P., Rao, K. B., Dhayalini, B., Saibabu, S., Parivallal, S., Ravisankar, K., & Iyer, N. R. (2014). Long-term prestress loss and camber of box-girder bridge. ACI Structural Journal, 111(6), 1297-1306..

[18] Pillai, R. G., Hueste, M. D., Gardoni, P., Trejo, D., & Reinschmidt, K. F. (2010). Time-variant service reliability of post-tensioned, segmental, concrete bridges exposed to corrosive environments. Engineering Structures, 32, 2596-2605.

[19] Kristek, V., Bažant, Z. P., Zich, M., & Kohoutkova, A. (2006). Box girder bridge deflections. Concrete international, 28(01), 55-63.

	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 140 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

[20] Bažant, Z. P., & Panula, L. (1978). Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. *Materials and Structures*, 11(5), 317-328.

[21] Yazdizadeh, Z., Marzouk, H., & Hadianfard, M. A. (2017). Monitoring of concrete shrinkage and creep using fiber bragg grating sensors. *Construction and Building Materials*, 137, 505-512.

[22] Chassiakos, A. P., Vagiotas, P., & Theodorakopoulos, D. D. (2005). A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges. *Advances in Engineering Software*, 36(11), 740-749.



[23] Rehman, K. U., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 58-86.

[24] Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías INVIAS, Ministerio de Transporte. 2006. p 28-41.

[25] Ranaivomanana, N., Multon, S., & Turatsinze, A. (2013). Basic creep of concrete under compression, tension and bending. *Construction and Building Materials*, 38, 173-180.

[26] Diaz Duran, E. F., Santos Duran, C. M., & Benjumea Royero, Jose Miguel, dir. (2014). Efecto de la humedad relativa en el comportamiento estructural de un puente viga cajon.

[27] Su, L., Wang, Y., Mei, S., & Li, P. (2017). Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep. *Construction and Building Materials*, 152, 250-258.

 	ESTUDIO DE DEFORMACIONES A LARGO PLAZO DE PUENTES VIGA-CAJÓN CONSTRUIDOS POR VOLADIZOS SUCESIVOS EN COLOMBIA	Página: 141 de 129
	VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - VIE	Versión: 01
		20 octubre 2017

[28] Bažant, Z. P., & Carol, I. (1993). Creep and shrinkage of concrete. E & FN Spon. p 77-82.

I) COMPROMISOS

Para el cumplimiento de la generación de mínimo 30 puntos de productividad académica que exige la convocatoria, el equipo de trabajo se compromete con los siguientes productos:

- Dos artículos originales en revista indexada, dentro del cuartil 3 (bases de datos ISI-CSI o SCOPUS), 16 puntos
- Artículo original en revista indexada, dentro del cuartil 4 (), 3 puntos
- 3 Trabajo de pregrado aprobado, 3 puntos
- 1 propuesta de tesis de maestría aprobada, 1 puntos
- 1 Trabajo de maestría graduado, 3 puntos
- 1 Ponencia internacional, 2 puntos
- 2 Ponencias nacionales, 2 puntos

m) PRESUPUESTO

Ver anexo.