Esfuerzos principales en almas de vigas en puentes construidos por voladizos sucesivos

Ximena Areiza García

Informe de práctica para optar al título de Ingeniera Civil

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Asesor

Wilber Humberto Vélez Gómez, Doctor en estructuras y construcción civil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Apartadó, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Areiza García, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Areiza, X. (2025). *Esfuerzos principales en almas de vigas en puentes construidos por voladizos sucesivos* [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Apartadó, Colombia.

creative commons BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres, por su constante apoyo, amor y esfuerzo.
Gracias por estar en cada paso del camino.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a mi director(a) de tesis, Wilber Humberto Vélez, por su orientación y apoyo durante este trabajo. Agradezco especialmente a LyL Ingenieros Consultores por compartir su experiencia profesional, y a la Universidad de Antioquia por brindarme el apoyo institucional que hicieron posible este proyecto. Finalmente y más importante, agradezco profundamente el respaldo de mi familia en este proceso.

Tabla de contenido

Resumen 9

Abstract 10

1. Introducción 11

2. Objetivos 12

2.1 Objetivo general 12

2.2 Objetivos específicos 12

3. Marco teórico 13

3.1 Puentes construidos por voladizos sucesivos 13

3.2 Comportamiento estructural de vigas cajón 13

3.3 Esfuerzos Principales en el Alma de la Viga Cajón 14

3.4 Límites de esfuerzos principales según normativas 16

3.4.1 Código Colombiano de Puentes CCP-14 16

3.4.2 Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCDSP-95 17

3.4.3 AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges 17

3.4.4 AASHTO LRFD Bridge Specifications 17

3.5 Fenómeno de fisuración en las almas 19

4.1 Revisión documental normativa 22

4.2 Análisis de esfuerzos principales en puente en luz central 160 m 22

4.3 Análisis comparativo de límites de esfuerzo 25

4.4 Interpretación de resultados 25

5. Análisis de resultados 26

5.1 Análisis de normativas 26

5.2 Análisis de caso práctico 26

6. Conclusiones y recomendaciones 29

Referencias 30

Lista de tablas

Tabla 1 Combinación de carga 24

Tabla 2 Comparación de límites de esfuerzos principales 28

Lista de Figuras

Figura 1 Secciones transversales típicas de vigas cajón 14

Figura 2 Sección transversal de viga cajón con coordenadas de bloque de esfuerzos. 15

Figura 3 Bloque de esfuerzos en el alma de viga cajón 15

Figura 4 Representación de esfuerzos principales en el círculo de Mohr 18

Figura 5 Elevación del puente 23

Figura 6 Sección transversal de la viga cajón 23

Figura 7 Diagrama de círculo de Mohr para el estado de esfuerzo 26

Figura 8 Diagrama de círculo de Mohr para el estado de esfuerzo 28

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CCP-14.	Código Colombiano de Puentes – Versión 2014
AASHTO.	American Association of State Highway and Transportation Officials
LRFD.	Load and Resistance Factor Design
CCDSP-95	Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Edición 1995
m.	Metros
Cm.	Centímetros
mm.	Milímetros
MPa.	Mega Pascales
Psi.	Libras por pulgada cuadrada

Resumen

Los puentes construidos por voladizos sucesivos han ganado relevancia en los últimos años, puesto que estos ofrecen una solución para salvar grandes luces sin apoyos intermedios. Las vigas cajón que constituyen estos puentes están sometidos a esfuerzos cortantes y normales, los cuales pueden ocasionar fisuras, comprometiendo la integridad y funcionalidad de la infraestructura, para evitar esto la normativa colombiana establece unos límites que los define como esfuerzos principales, sin embargo, se observa una falta de claridad técnica sobre los fundamentos de estas expresiones, por ello, este proyecto de prácticas busca revisar y analizar los principios estructurales y normativos que dan origen a dichas ecuaciones. La metodología incluirá una revisión bibliográfica de normativas tanto nacionales como internacionales, adicionalmente, se evaluarán los esfuerzos principales de un caso práctico de un Puente, con ello se espera proporcionar información valiosa, buscando contribuir en consideraciones que permitan mejorar los criterios en el diseño y durabilidad de este tipo de puentes.

Palabras clave: Esfuerzos principales, fisuras, voladizos sucesivos.

Abstract

Bridges constructed using the balanced cantilever method have gained relevance in recent years, since they provide an effective solution for spanning large spans without the need for intermediate support. Box girders forming these bridges are subjected to normal and shear stresses, which may cause cracking, compromising the infrastructure's integrity and functionality, to avoid this phenomenon the Colombian normative establish limits which classify these as principal stresses, however, it is observed a lack of technical clarity about the provision for these expressions, therefore, this practical project seeks to review and analyze the structural and regulatory principles that lead to these equations. The methodology will include a bibliographical overview of national and international regulations. Additionally, the principal stresses of a practical case will be evaluated, with this, it is expected to proportionate valuable information, seeking to contribute to the considerations that allow to improve the design criteria and durability of these types of bridges.

*Keywords***:** Principal stresses, cracking, balanced cantilever method.

1. Introducción

En el ámbito de la ingeniería estructural, los puentes construidos por voladizos sucesivos se convierten en una solución en obras de infraestructura vial de gran magnitud, especialmente cuando es requerido extenderse grandes luces o intervenir terrenos con características complicadas. Este sistema constructivo permite ejecutar el puente sin necesidad de apoyos intermedios, utilizando secciones que se colocan de manera alternada desde los estribos, lo que genera condiciones particulares de carga y esfuerzo durante la vida útil y construcción de la estructura.

Uno de los aspectos críticos presentados en este tipo de puentes es la distribución de esfuerzos en el alma de las vigas cajón, específicamente los esfuerzos principales, que pueden causar fisuras al concreto afectando negativamente la durabilidad de la estructura, la normativa colombiana de puentes establece unos límites para evitar que se presenten fisuras bajo condiciones de servicio, sin embargo, estos valores si bien son comúnmente utilizados, la norma no profundiza en su fundamento teórico ni su validación experimental, lo que genera interrogantes sobre sus efectos en contextos estructurales específicos.

De acuerdo con ello, este proyecto de prácticas se propone a realizar un análisis bibliográfico de los esfuerzos principales en las almas de las vigas tipo cajón en puentes construidos por voladizos sucesivos, su fenómeno físico, la identificación de cómo se generan y se transfieren al alma del puente, y evaluar si los coeficientes definidos representan de manera adecuada los estados de esfuerzo desarrollados en esta zona. El proyecto se enfocará en una revisión teórica de tanto la normativa nacional como internacional de los fundamentos del estado de esfuerzos principales.

La elección de este enfoque radica en comprender el origen y justificación de los coeficientes normativos utilizados para establecer los límites admisibles de esfuerzos en las almas, y como estos se relacionan con el comportamiento real de la estructura. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa, buscando contribuir en consideraciones que permitan mejorar los criterios en el diseño y durabilidad de los puentes, aportando así al avance de la ingeniería estructural.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar el fenómeno de los esfuerzos principales en los puentes construidos por voladizos sucesivos con el fin de verificar los fundamentos en los límites que establece la norma colombiana de puentes CCP-14, como se generan y se transfieren dichos esfuerzos dentro de la estructura.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar bibliográficamente los cálculos efectuados para establecer los límites de esfuerzos principales en las almas de los puentes construidos por voladizos sucesivos.
- Comparar los fundamentos de las normativas nacionales e internacionales al establecer dichos límites.
- Comprender los mecanismos de transferencias de los esfuerzos principales.
- Interpretar los resultados obtenidos con el fin de proponer criterios que mejoren la evaluación estructural de los puentes.

3. Marco teórico

3.1 Puentes construidos por voladizos sucesivos

La construcción de un puente tiene como fin "salvar" tanto obstáculos naturales, como valles, ríos, lagos y similares; como artificiales, por ejemplo, carreteras, vías férreas. (Gerardino, 2011)

Los puentes construidos por voladizos sucesivos según su procedimiento constructivo pueden ser prefabricados o ejecutados "in situ". El tablero avanza por tramos sucesivos soportando la parte construida el peso propio del tramo siguiente. Las dovelas prefabricadas se izan con medios de elevación potentes y se unen a las anteriores. Si se ejecutan hormigonado "in situ", existe un carro de avance que se apoya en las dovelas anteriores, asegurando la estabilidad de cada etapa con el pretensado de cables cuando la nueva dovela adquiere la resistencia suficiente. (Yepes, 2017).

La tipología de puentes construidos por voladizos sucesivos se aplica usualmente para luces entre 50 m y 250 m.

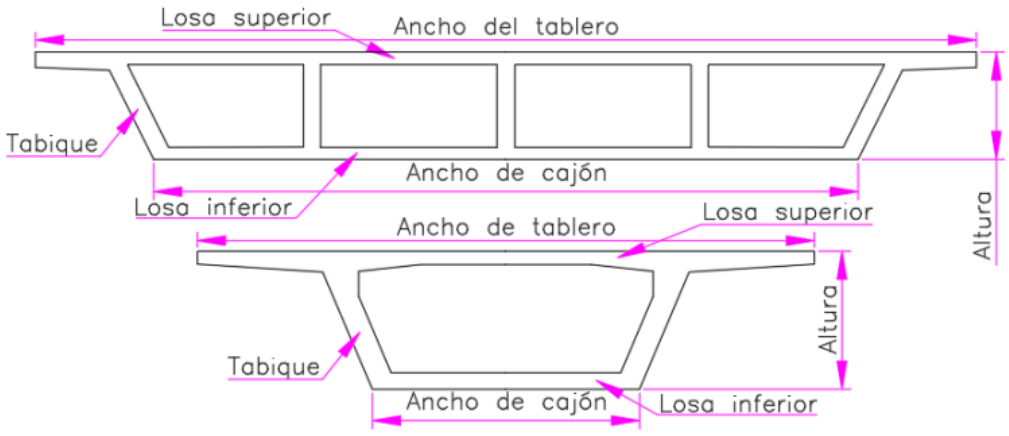
3.2 Comportamiento estructural de vigas cajón

La sección cajón está compuesta principalmente de tres partes, una losa superior, una estructura de nervadura o alma y una losa inferior, al unirse la estructura crea un cajón cerrado, que se destaca por su rigidez a flexión y torsión. (Montañas, 2004).

La losa superior materializa la plataforma, conduce las cargas a las almas y se comporta como cabeza a compresión. Las almas se encargan de llevar las cargas de cortante a los apoyos. Y la losa inferior cierra el circuito de torsión y almacena las compresiones del pretensado. Las vigas de sección cajón de una sola celda son las secciones más eficientes para su construcción y de hecho son las que más se utilizan. Las almas pueden ser perpendiculares a la losa o inclinadas, pero cabe anotar que las inclinadas presentan algunas dificultades para el encofrado cuando el canto de la viga es variable. El espesor de las almas y de la losa inferior debe ser suficiente para acomodar el número de tendones requeridos en el centro del vano. (Gerardino, 2011).

Figura 1

Secciones transversales típicas de vigas cajón



Nota. Fuente: Puentes de concreto de viga cajón híbridos con paredes en celosía.

De acuerdo con la CCP-14, en la etapa de predimensionamiento, se emplean relaciones que permiten estimar las dimensiones iniciales del cajón. El espesor mínimo de las almas para aquellas con torones de postensionado longitudinal o vertical es de 300 mm y para aquellas que cuenten con torones de postensionado tanto longitudinales con verticales es de 375 mm. La altura de la viga cajón está relacionada con la longitud del vano principal, mientras que las losas superior e inferior se dimensionan en función del ancho total del tablero.

3.3 Esfuerzos Principales en el Alma de la Viga Cajón

En el análisis estructural de puentes tipo viga cajón construidos por voladizos sucesivos, la verificación de esfuerzos principales es necesario para comprobar lo adecuado de las almas para resistir cortante longitudinal y torsión. El esfuerzo principal de tracción es aquel que resulta del esfuerzo residual de tracción de largo plazo y fuerza cortante máxima combinada con cortante por esfuerzo de torsión en el eje neutro de la alma crítica. (INVIAS, 2014).

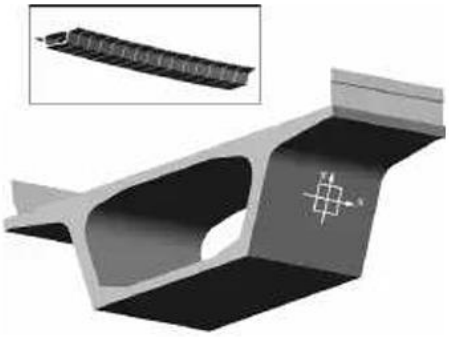
En el método de construcción por voladizos sucesivos, los cables de tensado balancean los momentos flectores negativos durante la construcción y en la condición de servicio. Después del cierre, el puente es postensado con cables de continuidad para formar una estructura continua y resistir los momentos flectores positivos en la región del centro de la luz. (Zhi-Qi & Zhongguo, 2021). Este proceso constructivo genera acciones transitorias y no simétricas, que inducen esfuerzos cortantes y torsionales localizados en las almas. Esto contrasta con los puentes de viga cajón construidos mediante métodos apoyados convencionales, donde las acciones durante la

ejecución son más equilibradas y uniformes. Por ello, se revisan estas tracciones principales para prevenir fisuras diagonales.

En las almas, las fisuras pueden formarse dado al estado biaxial de esfuerzos que resulta de una combinación de esfuerzos cortantes y normales. Los esfuerzos normales usualmente se encuentran en la dirección longitudinal σ_x, estos se ocasionan por acciones de deformación por cargas gravitacionales, efectos a largo plazo y fuerzas de postensado. El esfuerzo normal vertical σ_y, generalmente son iguales a cero, a menos que se presente un caso de esfuerzos biaxiales en las almas, por ejemplo, una viga cajón con barras verticales de postensado en las almas. El esfuerzo cortante τ, es causado por fuerzas directas de cortante, así como por efectos torsionales. (Okeil, 2006). A continuación, se presenta la sección de una viga cajón con la ubicación del bloque de esfuerzos.

Figura 2

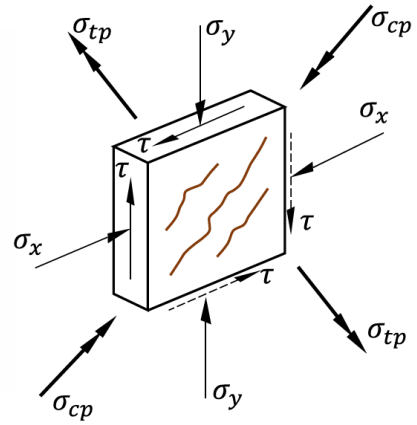
Sección transversal de viga cajón con coordenadas de bloque de esfuerzos.



Nota. Fuente: Allowable Tensile Stress for Webs of Prestressed Segmental Concrete Bridges

Figura 3

Bloque de esfuerzos en el alma de viga cajón



Nota. Fuente: Allowable Tensile Stress for Webs of Prestressed Segmental Concrete Bridges

El cálculo de los esfuerzos principales se realiza a partir del estado del bloque de esfuerzos, con la teoría del círculo de Mohr, usando las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) + \tau_{xy}^2}$$

Donde:

$\sigma_{x\,y}$ = Esfuerzos normales en las direcciones ortogonales.

τ_{xy} = Esfuerzo cortante.

3.4 Límites de esfuerzos principales según normativas

3.4.1 Código Colombiano de Puentes CCP-14

El código colombiano de puentes CCP-14 es la norma oficial adoptada por el Ministerio de Transporte de Colombia. Esta norma establece los lineamientos para el diseño estructural de puentes basándose en la AASHO LRFD 7ª edición.

Un límite para la tracción principal en el eje neutro del alma se añadió en 2004. Esta verificación requiere que se modifique para torsión la demanda de cortante, no la resistencia. (INVIAS, 2014). La ecuación 5.8.2.1-7 aclara cómo se modifica la demanda para la torsión para secciones en cajón:

$$V_u + \frac{T_u d_s}{2A_o}$$

Donde:

V_u = Fuerza de cortante equivalente mayorada.

T_u = Momento torsional mayorado

d_s = Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo convencional a tracción.

A_o = Área encerrada por la trayectoria del flujo de cortante, incluyendo cualquier área de huecos.

El código colombiano de puentes define el esfuerzo principal admisible como una fracción de la resistencia a la compresión del concreto. El límite permitido después de todas las pérdidas dado en la tabla 5.9.4.2.2-1 es:

$$\sigma_1 = 0.29 f'c\ (MPa)$$

Este esfuerzo se produce en el eje neutro del alma, en la sección 5.8.5, se indica que el esfuerzo principal se debe determinar utilizando la teoría clásica de vigas y el círculo de Mohr.

También, se debe tener en cuenta el esfuerzo de compresión debido a los torones verticales ubicados en el alma y las tracciones locales producidas en las almas resultantes del anclaje de los torones.

3.4.2 Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCDSP-95

La CCDSP-95 establece que para las dovelas cercanas a los apoyos que no presenten fisuras el límite de esfuerzos a tracción principal es:

$$6\sqrt{f'c}\ (psi)$$

3.4.3 AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges

El límite de esfuerzo principal a tracción después que ocurren todas las pérdidas según la AASHTO estándar es:

$$6\sqrt{f'c}\ (psi)$$

3.4.4 AASHTO LRFD Bridge Specifications

El esfuerzo a tracción principal debe ser determinado usando la combinación de esfuerzos cortantes y axiales los cuales producen el mayor esfuerzo principal a tracción. Para vigas cajón los esfuerzos a cortante deben ser calculados usando la cortante vertical y la torsión correspondiente. (AASHTO, 2024). El esfuerzo a cortante para vigas cajón es:

$$\tau = \frac{VQ_g}{I_g B_w} + \frac{T}{2A_o b_w}$$

Donde:

τ = Esfuerzo a cortante en el alma debido a cortante vertical.

V = Fuerza cortante por la combinación de carga de servicio III.

Q_g = El primer momento respecto al eje neutro del área bruta de concreto por encima o por debajo de la altura del alma donde se verifica la tensión principal.

I_g = Momento de inercia de la sección bruta de concreto respecto al eje centroidal, despreciando el refuerzo.

b_w = Ancho del alma a la altura del alma donde se verifica la tensión principal.

T = Momento torsional correspondiente para la combinación de carga de servicio III.

B_w = Ancho total del alma en una celda o dos celdas simétricas donde se verifica la tensión.

A_o = Área encerrada por la trayectoria del flujo de cortante, incluyendo cualquier área de huecos.

Al igual que la CCP-14, la AASHTO LRFD establece que para el cálculo de los esfuerzos principales se debe hacer uso del círculo de Mohr, donde se toma en cuenta el esfuerzo a cortante, el esfuerzo horizontal en el alma, y el esfuerzo normal vertical en el alma que, usualmente es igual a cero ya que normalmente no se presenta un tensionamiento vertical. Cuando la estructura está sometida a cargas del estado límite de servicio III y ya han ocurrido todas las pérdidas, el límite de tracción principal es:

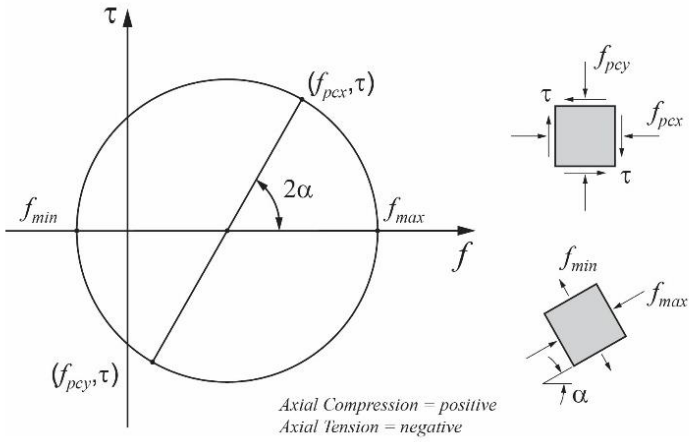
$$0.110\lambda\sqrt{f'c}\ (ksi)\ o\ 3.5\sqrt{f'c}\ (psi)$$

El coeficiente λ es un factor que depende del tipo de concreto que se está usando, para propósitos del proyecto será un concreto convencional, por tanto, λ será igual a uno. Estos límites se derivan de estudios experimentales y análisis teóricos que consideran la resistencia al corte y la capacidad de carga del concreto.

El esfuerzo principal a tracción se determina basándose en el análisis del círculo de Mohr.

Figura 4

Representación de esfuerzos principales en el círculo de Mohr



Nota. Fuente: AASHTO LRFD Design Specifications 7th edition.

Donde el esfuerzo principal mínimo en el alma, tensión negativa:

$$f_{min} = \frac{1}{2}\left(\left(f_{pcx} + f_{pcy}\right) - \sqrt{\left(f_{pcx} - f_{pcy}\right)^2 + (2\tau)^2}\right)$$

Donde el esfuerzo principal máximo en el alma, compresión positiva:

$$f_{max} = \frac{1}{2}\left((f_{pcx} + f_{pcy}) + \sqrt{(f_{pcx} - f_{pcy})^2 + (2\tau)^2} \right)$$

Los métodos de cálculo de la tracción principal indicados en la AASTO LRFD solo incluyen los esfuerzos cortantes y normales en el cálculo de los esfuerzos principales. Aunque estos métodos no consideran el efecto de los esfuerzos a flexión debido a momentos transversales en el cálculo de esfuerzos principales, se ha demostrado que son adecuados para el diseño de puentes de viga cajón bien proporcionados, en conjunto con los límites de esfuerzo principal establecidos en esta especificación. El diseñador debe ser consciente de que los esfuerzos de flexión causados por momentos transversales sí afectan los esfuerzos principales y podría considerar su inclusión en el cálculo de esfuerzos principales para puentes de viga cajón con proporciones atípicas. El límite de tensión principal establecido en esta especificación no se aplica estrictamente si se incluyen los esfuerzos de flexión en el cálculo de esfuerzos principales. (AASHTO, 2024)

3.5 Fenómeno de fisuración en las almas

Las almas de las vigas cajón en puentes construidos mediante voladizos sucesivos están sometidos a ciertos estados de carga que pueden ocasionar esfuerzos principales significativos, los cuales dependen del proceso constructivo quien ocasiona variaciones en los mismos, también, pueden ser generados por condiciones de servicio. Estos esfuerzos a su vez, en ocasiones son responsables del desarrollo de fisuras inclinadas o diagonales que comprometen la seguridad e integridad de la estructura.

Con el fin de controlar las fisuras por cortante se requiere que los esfuerzos principales se encuentren dentro de los límites admisibles. Las fisuras causadas por cortante son inclinadas a un ángulo aproximadamente de 45 grados, estas usualmente se encuentran dentro de un rango de ángulo entre 15 a 60 grados al eje longitudinal de la viga. Normalmente, aparecen cerca a los apoyos o cerca al centro de la luz donde existe la mínima profundidad de la sección transversal o donde se proveen zonas de anclajes para los cables de postensado. Las fisuras se desarrollan cuando el esfuerzo principal a tracción debido a cargas de servicio y de fuerzas de resistencia excede la resistencia a tracción del concreto. (Notkus & Kamaitis, 1999)

La fisuración en las almas de las vigas de los puentes postensados se ha presentado en varias obras a pesar de que su diseño estructural cumple con las especificaciones normativas. Esta

aparente contradicción evidencia la necesidad de una evaluación más integral de los mecanismos de fisuración, incluyendo aquellos no considerados explícitamente por las normas. En un estudio realizado por Zhi y Zhongguuo (2021), se documentaros varios casos de fisuración en vigas postensadas como, por ejemplo, los puentes Gr̈ondal y Alvik en Suecia quienes presentaron fisuras por cortante después de tan sólo 2 años de servicio, según análisis realizados por Malm y Sundquist la fisuras se originaron durante la fase de construcción debido a postensado de los cables en los patines. En Lituania, se han reportado fisuras recurrentes en las almas de las vigas cajón de puentes segmentales, a pesar de que los cálculos estructurales realizados conforme a la normativa vigente indicaban márgenes de seguridad suficientes. En China, el Ministerio del Instituto de Investigación de Transporte reportó que aproximadamente el 86 % de los puentes con vigas cajón y luces superiores a 60 metros presentaban fisuras por cortante en las almas. Un caso representativo es el puente Taiping, que con luces de hasta 106 metros desarrolló fisuras diagonales extensas en las almas, especialmente en las zonas adyacentes a los apoyos. Otros casos documentados de este fenómeno también se han identificado en puentes ubicados en Estados Unidos, como el puente Kishwaukee River y el puente Hathaway.

Las causas de las fisuras en las almas de los puentes construidos de voladizos sucesivos pueden ser por múltiples razones, como: esfuerzos por cortante y torsión como principales causantes de la fisuración en las almas. El cortante es generado por las cargas verticales cercanas a los apoyos, mientras que la torsión se genera por las cargas excéntricas o geometrías curvas que inducen momentos al eje longitudinal.

Otra causa encontrada en el estudio reciente de Zhi y Zhongguo (2021), han señalado la existencia de esfuerzos cortantes adicionales inducidos por el postensado, principalmente en las zonas de anclaje. Estos esfuerzos se originan cuando los cables de postensado están desviados del eje neutro, lo que genera componentes de carga transversal no contemplados en los cálculos tradicionales de esfuerzos principales en las almas.

Adicionalmente, el comportamiento térmico también representa un factor crítico en la fisuración de las almas, especialmente en puentes construidos con vigas cajón postensadas (Malm & Ansell, 2012). Las variaciones de temperaturas, tanto diurnas como estacionales, pueden inducir dilataciones y contracciones diferenciales en el concreto, lo que puede dar lugar a microfisuras o fisuras iniciales en las almas. Si estas fisuras coinciden con zonas donde actúan esfuerzos

significativos de cortante o torsión, ya sean tradicionales o inducidos por el postensado, pueden prolongarse o agrandarse, afectando la integridad estructural y acelerando procesos de degradación.

4. Metodología

La metodología empleada para los análisis de los parámetros de límites de esfuerzos principales en las almas de la viga cajón en los puentes construidos por voladizos sucesivos consistirá en un estudio descriptivo, documental y normativo con un enfoque cualitativo y cuantitativo. Este enfoque se comprende como un proceso de recopilación que analiza y presenta datos de manera cualitativa, con el objetivo analizar y revisar cada límite establecido por las diferentes normativas, demostrando las relaciones entre ellos. Además, se analizará un caso práctico de un puente, con el fin de comprender mejor los esfuerzos principales.

4.1 Revisión documental normativa

En esta primera etapa, se lleva a cabo un proceso de revisión bibliográfica y normativa profunda de los documentos técnicos para puentes de concreto construidos por voladizos sucesivos. Esta revisión se enfoca en las normativas Código Colombiano de Puentes CCP-14, Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCDSP-95, AASHTO Estándar (Standard Specifications for Highway Bridges) y AASHTO LRFD (Bridge Design Specifications).

La revisión incluyó criterios de diseño relacionados con los esfuerzos principales como el esfuerzo residual axial a largo plazo y el esfuerzo cortante máximo.

4.2 Análisis de esfuerzos principales en puente en luz central 160 m

Para la evaluación y análisis de los esfuerzos principales en las almas de los puentes construidos por voladizos sucesivos se toma como caso práctico un puente que cuenta con una longitud total de 286 m medidos por el eje del puente, proyectándose como una viga postensada aligerada en forma de cajón. Con sección transversal de 13,16 m de ancho y altura variable. Los esfuerzos principales se evaluarán en la luz central, entre los ejes 2 y 3.

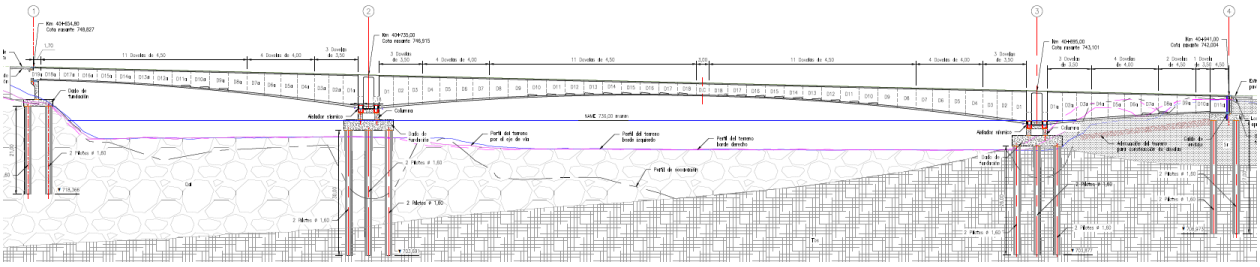
La sección transversal incluye 2 carriles de 3,65 m, 2 bermas de 1,80 m, 1 andén de 1,50 m, 2 barreras tipo New Jersey de 0,38 m y 1 baranda peatonal.

El voladizo del eje 3 se plantea descompensado, la altura de la viga cajón varía de 7,80 m en los apoyos hasta 3,00 m en la dovela de cierre y sobre el estribo del eje 1 y 4,15 m sobre el estribo del eje 4. El puente contará con dos apoyos intermedios, con tres luces de 80,20 m – 160 m

– 46 m respectivamente. A continuación, se presenta la vista en elevación del puente, así como su sección transversal.

Figura 5

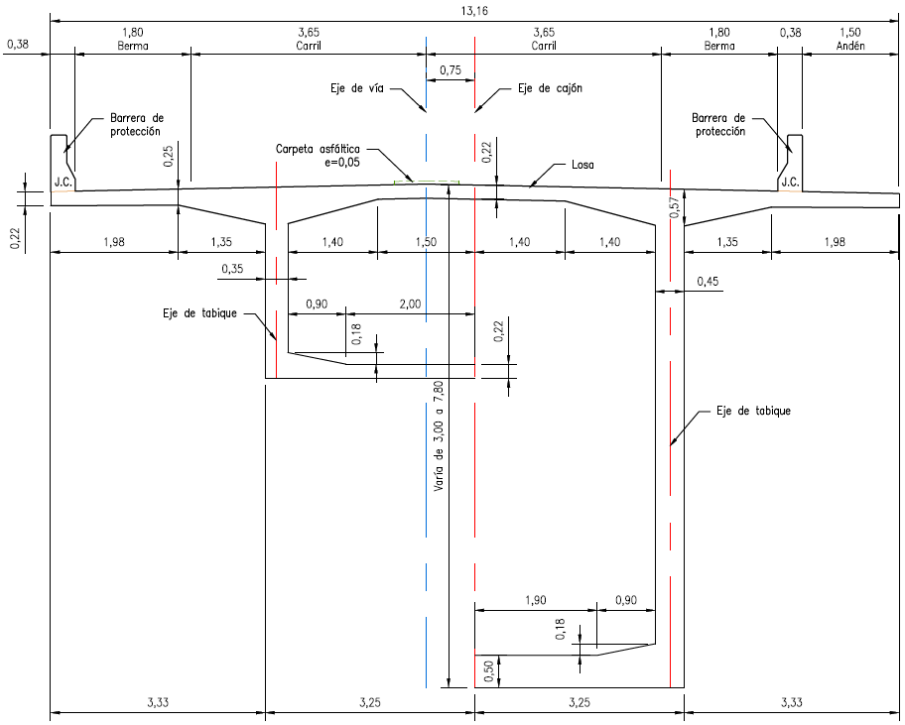
Elevación del puente



Nota. Fuente: LyL Ingenieros Consultores SAS.

Figura 6

Sección transversal de la viga cajón



Nota. Fuente: LyL Ingenieros Consultores SAS.

Los esfuerzos principales se analizan bajo la combinación de carga de servicio III, la cual se utiliza para investigar tensiones de tracción en componentes de concreto preesforzado.

Tabla 1
Combinación de carga

Combinación de carga	DC	DW	CR+SH	PS	TU	TG	LL+I
Servicio III	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.8

Fuente: Post-Tensioned Box Girder Manual (2016).

Las secciones críticas con los máximos esfuerzos principales se toman a una distancia d_v desde los diafragmas, la profundidad efectiva el cortante (d_v) está dada por:

$$d_v = \max\left(\frac{M_n}{A_{ps}f_{ps}}, 0.9d_e, 0.72h\right) \qquad AASHTO\ LRFD$$

$$d_v = \frac{M_n}{A_s f_y + A_{ps}f_{ps}} \qquad CCP14$$

Donde:

M_n = resistencia nominal a flexión.

A_{ps} = área del acero de preesfuerzo.

f_{ps} = esfuerzo promedio en el acero de preesfuerzo.

d_e = profundidad efectiva desde la fibra extrema a compresión hasta el centroide.

h = altura del cajón.

A_s = área del refuerzo no tensionado.

f_y = resistencia de fluencia del acero.

Luego, es calculado el esfuerzo por cortante.

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

Donde:

V = fuerza por cortante vertical en la sección.

Q = primer momento del área.

I = momento de inercia en la sección.

b = Ancho de las almas menos el diámetro del ducto.

El círculo de Mohr es una representación gráfica del estado del plano de esfuerzos dado un punto.

4.3 Análisis comparativo de límites de esfuerzo

En la tercera etapa, se realiza un análisis comparativo de los límites de esfuerzos principales en las almas con aquellos obtenidos en el caso práctico, ya que deben ser evaluados para todos los puentes construidos de manera segmentada buscando que estos se encuentren dentro de los límites permitidos, con el objetivo de prevenir la aparición de fisuras en las almas.

4.4 Interpretación de resultados

Se concluye con la cuarta etapa, en la cual se revisa y se interpretan los resultados para una resistencia de concreto determinada, comparando la diferencia de los valores e interpretando que factores utilizados para la obtención de los límites pudieron contribuir a estas variaciones de valor, también, se presentan recomendaciones para futuros estudios alrededor de los aspectos.

5. Análisis de resultados

5.1 Análisis de normativas

El límite dado en la normativa CCP-14 en MPa es basado en la AASHTO LRFD en psi, en consecuencia, se realiza la respectiva conversión de la siguiente manera:

$$\frac{3.5\sqrt{f_c'}\ (psi)}{\sqrt{145.0377}} = 0.29\sqrt{f_c'}\ (MPa)$$

Sin embargo, se observa que el límite establecido en la norma CCP-14 es:

$$0.29 f_c'\ (MPa)$$

Por tanto, se infiere que posiblemente falta incluir la resistencia a la compresión dentro de la raíz, esto causa que se obtenga un resultado mayor a lo esperado, es decir, que se considera un criterio menos conservador que puede no ser adecuado cuando se evalúa la tracción principal en las almas.

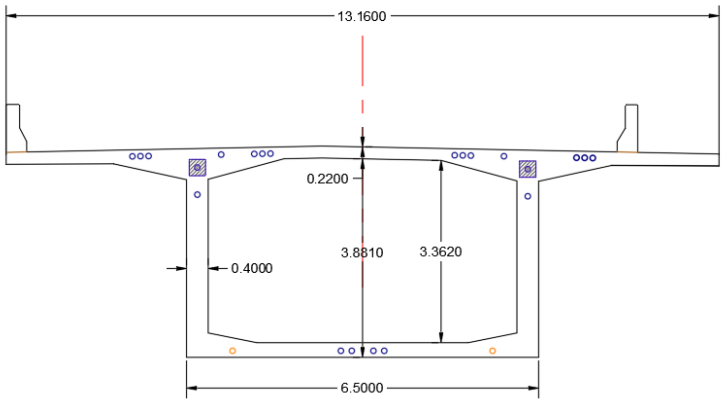
En la AASHTO LRFD en la décima edición define que el esfuerzo principal depende del cortante y la torsión.

5.2 Análisis de caso práctico

Con el fin de evaluar el comportamiento de los esfuerzos principales en las almas, se seleccionó la dovela D13, ubicada entre los ejes 2 y 3 como punto de análisis. A continuación, se muestran las dimensiones de la sección transversal de la dovela D13.

Figura 7

Diagrama de círculo de Mohr para el estado de esfuerzo



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades de la sección transversal son:

Momento de inercia (*Ig)* = 13.59 x 10^{12} mm^4

Primer momento de área (*Q)* = 2.62 x 10^9 mm^3

- ***Cargas bajo condición de servicio***

Fuerza cortante vertical (*V*) = 9923.71 kN

Momento torsional (*T*) = 5844.60 kN-m

Luego, según estos datos, se calcula el ***esfuerzo por cortante vertical***:

$$\tau_v = \frac{9923710\ N * 2.62 \text{ x } 10^9\ \text{mm}^3}{13.59 * 10^{12} mm^4 * 400\ mm} = 4.78\ MPa$$

El ***área encerrada por flujo de cortante (Ao)***, está dada por:

$$A_o = 19.61 * \ 10^6\ mm^2$$

Luego, se determina el ***esfuerzo cortante por torsión***:

$$\tau_t = \frac{5.8446 * 10^9\ N/mm}{2 * 19.61 * 10^6 mm^2 * 400\ mm} = 0.37\ MPa$$

Así, el ***esfuerzo total cortante*** es:

$$\tau = 5.15\ MPa$$

El esfuerzo normal en este punto es el esfuerzo axial en la sección en el eje neutral, los esfuerzos utilizados son:

$$\sigma_x = \sigma_{DC} + \sigma_{DW} + \sigma_{PS} + \sigma_{CR+SH}$$

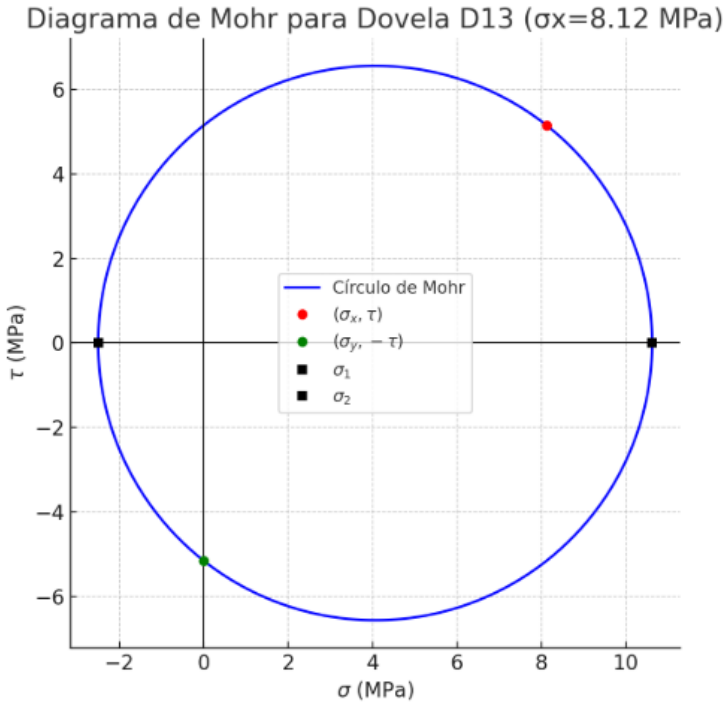
$$\sigma_x = 8.12\ MPa$$

$$\sigma_y = 0$$

El círculo de Mohr que representa este estado de esfuerzo es:

Figura 8

Diagrama de círculo de Mohr para el estado de esfuerzo



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso no se presenta compresión vertical, de acuerdo con esto, el radio (R) del círculo de Mohr puede ser expresado como:

$$R = \sqrt{\left(\frac{8.12\ MPa}{2}\right)^2 + 5.15\ MPa^2} = 6.55\ MPa$$

El esfuerzo principal en la sección es:

$$\sigma_{max} = \frac{8.12\ MPa}{2} + 6.55\ MPa = 10.61\ MPa$$

Finalmente, se compara el esfuerzo principal con los límites establecidos por las normativas.

Tabla 2

Comparación de límites de esfuerzos principales

Norma	Límite admisible	Resultado	Verificación
CCP-14	12.18 MPa	10.61 MPa	Cumple
AASHTO LFRD	1.88 MPa	10.61 MPa	No cumple

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Según CCP-14, la dovela D13 cumple con el límite normativo para esfuerzo principal en el alma. Sin embargo, según AASHTO LRFD, el esfuerzo principal supera el límite permisible lo cual puede sugerir un potencial de fisuración bajo cargas de servicio.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que, el análisis tradicional de los esfuerzos principales puede no ser representativo del fenómeno en puentes construidos por voladizos sucesivos. Este método al sólo considerar el cortante vertical y torsión bajo cargas de servicio no se toman en cuenta esfuerzos adicionales por cortante generados por las fuerzas de postensado en zonas de anclajes, así como aquellos esfuerzos generados por variaciones en los gradientes de temperatura. La exclusión de estos efectos en el diseño estructural puede derivar en fisuración no prevista en las almas de las vigas, afectando negativamente la durabilidad de la estructura y generando deflexiones a largo plazo mayores a las inicialmente estimadas por el diseñador.

El límite dado por la CCP-14 puede resultar en un análisis poco conservador, pues parece omitir la raíz cuadrada de la resistencia del concreto, lo que incrementa la capacidad admisible y puede favorecer fisuraciones en las almas no previstas. Se recomienda revisar e incluir en futuros cálculos la raíz a dicha expresión para garantizar la seguridad de la estructura.

Resulta fundamental que las normativas nacionales como internacionales profundicen en el análisis de los esfuerzos principales en las almas de los puentes segmentales, pues no queda claro en que se fundamentan las expresiones que definen sus límites. Estos criterios son esenciales para comprender el comportamiento estructural, para así garantizar la durabilidad de la obra y evitar deflexiones excesivas a lo largo de su vida útil.

Finalmente, es imprescindible adoptar un enfoque más detallado y representativo de los esfuerzos principales, incluyendo aquellos factores que puedan causar esfuerzos adicionales y revisar los criterios normativos para asegurar la durabilidad de los puentes segmentales.

Referencias

AASHTO. (2024). *LRFD Bridge Design Specifications 10th Edition.* Washington DC.

Gerardino, M. (2011). *Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos sucesivos.* Cataluña.

INVIAS. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14.* Bogotá.

Malm, R., & Ansell, A. (2012). Crack formation in two segmentally constructed balanced cantilever box-girder bridges. 151-154.

Montañas, L. (2004). *Análisis y Diseño de Vigas Cajón en Concreto para Puentes Vehiculares.* Bogotá: Universidad de los Andes.

Notkus, A., & Kamaitis, Z. (1999). Evaluation of Shear Stresses in the Web of Segmental Box-Girder Concrete Bridges. *STATYBA - CIVIL ENGINEERING*, 47-52.

Okeil, A. (2006). Allowable Tensile Stress for Webs of Prestressed Segmental Concrete Bridges. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 488-495.

Yepes, V. (2017, Septiembre 28). *Introducción a la técnica de construcción de puentes por voladizos sucesivos*. Retrieved from Universitat Politécnica de Valecia: https://victoryepes.blogs.upv.es/2017/09/28/voladizos-sucesivos/

Zhi-Qi, H., & Zhongguo, J. (2021). Additional Shear Stresses in Webs of Segmental Concrete Brigdes Due to Anchorage of Cantilever Tendons. *Bridge Engineering*, 1-13.