

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL AL MODIFICAR LA
ALTURA DEL PILONO EN UN PUENTE EXTRADOSADO DE LUZ CENTRAL
IGUAL 100 m

JHON ALEXANDER PEÑA BARRERA
ANDRES LEONARDO VARGAS AREVALO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2011

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL AL MODIFICAR LA
ALTURA DEL PILONO EN UN PUENTE EXTRADOSADO DE LUZ CENTRAL
IGUAL 100 m

JHON ALEXANDER PEÑA BARRERA
ANDRES LEONARDO VARGAS AREVALO

Trabajo de investigación para optar al título de
Ingeniero Civil

Director: Gustavo Chio Cho

Ph.D, Ingeniero Civil

Co-director: José Benjumea Royero

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2011

Deseo expresar todo mi agradecimiento a mi mamita Elvira Arévalo Miranda por motivarme cada día y darme entusiasmo en los momentos difíciles, por enseñarme a soñar y por contar siempre con el punto de vista más humano y sensible en todas las cosas, a mi papi Víctor Vargas Silva por siempre motivarme a estudiar y a superarlo, que estando a miles de kilómetros de distancia siempre sentí su apoyo incondicional, a mi hermano Ricardo Vargas que día a día me acompañó en el proceso de aprendizaje en la Universidad, que está conmigo en las buenas y en malas, a mi familia y en especial a mi tía Alcira, a mi abuelita Juanita por sus anécdotas y refranes que me han servido para la vida y a veces me sacan una sonrisa, a Carlos Fuentes que más que un profesor fue mi tío adoptivo ayudándome sin esperar nada a cambio, a todos ellos por ayudarme y desearme siempre lo mejor en mis sueños y proyectos.

También agradecer de manera muy especial a mi director, Profesor Gustavo ChioCho, por su paciencia y dedicación, por ayudarme en este proceso de enseñanza, a José Benjumea Royero por su ayuda incondicional en el desarrollo de este trabajo y a Johanna Pimiento por su colaboración desinteresada.

Recordar a muchas personas que aportaron su granito de arena que fue muy valioso y trascendental, mis compañeros de estudio y amigos Juan Rueda, Yuliana Bonett, Ana María Chávez, Jesús Camilo Ramírez, Yamid Osorio, Ricardo Díaz, Manuel Carrascal, Paola Rodríguez, Kely García, Carmen García no puedo dejar de mencionar a Diego Hernández, Wilmer Poveda, Andrés Báez, Johnattan Monsalve, José Acevedo, Nixon Sepúlveda y Diana Forero, a mi amigo de siempre Julián Torres y a una persona que a través de su amor a estado en todo momento para alegrarme la vida y no dejar apagar la luz de los sueños, Marcela Mendoza Rivero.

Indudablemente a mi compañero de proyecto de grado Jhon Peña y mis compañeros de lucha Mario Mejía y Diego Romero que a pesar de las dificultades seguimos firmes en la construcción de nuestro sueño y juntos logramos culminar el proyecto con éxito.

A mi tierra "Bucaramanga-La Ciudad Bonita", a su equipo de futbol, porque en esta ciudad y en su estadio viví, soñé, reí, anhele, compartí, llore, disfrute maravillosas etapas de mi vida. A la Universidad Industrial de Santander y a mis profesores que me transmitieron su conocimiento en esta etapa de mi vida.

ANDRES VARGAS AREVALO

Mi mayor agradecimiento a mi Dios que ha sido mi fortaleza y centro de vida, a mi Papá Alejandro Peña mi compañero de sueños por su apoyo incondicional y ser mi motor de excelencia, a mi “mita” Guillermina Barrera por su gran amor, dedicación y ejemplo de continuar adelante aun cuando han venido momentos difíciles, a mi hermana Karim Peña, por ser mi amiga quien me escucha esas largas noches hasta decirme “deje dormir”, a mi nona Helena Barrera por ser el pilar que nos ha sostenido a todos, en general cada uno de mis familiares tíos y primos especialmente a mis tías Zoraida Peña y Mariela Peña que en diferentes momentos de mi vida han sido mi apoyo para continuar adelante. A mis grandes amigos Carlos y Blanca Luna mis consejeros y guías.

Agradezco a todos lo que hicieron posible la culminación de este proyecto mi director Profesor Gustavo ChioCho por su gran apoyo, a José Benjumea Royero por su compromiso de corazón hacia la excelencia de nuestro trabajo y especialmente a Andrés Vargas ya que fue un buen compañero de proyecto con el ímpetu que se necesitó en cada circunstancia.

A mis compañeros de universidad y amigos junto a los que luce a lo largo de esta etapa de mi vida por el cumplimiento de nuestro sueño, Diego Romero, Mario Mejía, Paola Rodríguez, Yamid Osorio, Ricardo Díaz, Kely García, Manuel Carrascal, Fernando Gonzales.

A mis amigos por ser simplemente eso mis amigos Jhon Villamizar, Carolina Rodríguez, Jahir Vargas, Viviana Flórez, Fabio Duarte, Marisol Contreras, Melisa Tamara, Cesar Villamizar, Jessica Ariza.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander a la cual es un orgullo pertenecer y a los profesores por su calidad y entrega a mi formación como profesional.

JHON ALEXANDER PEÑA BARRERA

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	- 19 -
1. EL PUENTE CON PRETENSADO EXTRADOSADO	- 21 -
1.1 CONFIGURACION MORFOLOGICA DEL PUENTE EXTRADOSADO	
MODELO	- 27 -
1.2 TIRANTES	- 31 -
1.3 LA FATIGA EN EL SISTEMA DE ATIRANTAMIENTO DE UN PUENTE CON PRETENSADO EXTRADOSADO.	- 32 -
2. NECESIDAD DEL ESTUDIO	- 34 -
3. METODOLOGÍA	- 35 -
3.1 DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DEL MODELO ANALIZADO.	- 35 -
3.2 MODELO NUMERICO	- 43 -
3.3 DIMENSIONAMIENTO Y PRETENSIONAMIENTO DE LOS CABLES	- 45 -
3.4 DESCRIPCION DEL ESTUDIO PARAMETRICO	- 47 -
4. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL AL MODIFICAR LA ALTURA DEL PILONO.	- 48 -
4.1 INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LA ALTURA DEL PILONO EN LAS CARACTERISTICAS Y TENSIONES DE LOS TIRANTES.	- 48 -
4.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL PILONO EN LA DEFORMADA DEL TABLERO.	- 53 -
4.3 INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LA ALTURA DEL PILONO EN LA FUERZAS EN EL TABLERO.	- 55 -
5. CONCLUSIONES	- 60 -

6. BIBLIOGRAFIA

- 63 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Casos estudiados al variar la altura del pilono.	- 48 -
Tabla 2. Características y comportamiento de los tirantes al variar la altura del pilono	- 49 -
Tabla 3. Máxima oscilaciones de los tirantes al variar la altura del pilono.	- 52 -

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Comparación entre puentes pretensados, extradosados y atirantados.
[Benjumea, Chio & Maldonado, 2010] - 22 -
- Figura 2.** Puente con pretensado extradosado (Viaducto de Teror, Gran Canaria, España). - 24 -
- Figura 3.** Comparación del consumo de materiales para puentes pretensados construidos por voladizos sucesivos, extradosados y atirantados. Espesor promedio de concreto. [Mermigas, 2008] - 25 -
- Figura 4.** Puente Odawa Blue Way, Japón. - 28 -
- Figura 5.** Puente Integración Brasil-Perú, Brasil. - 29 -
- Figura 6.** Configuración de torre. Mástiles en “Y”. - 30 -
- Figura 7.** Anclajes a través de sillas - 31 -
- Figura 8.** Elementos que constituyen un cable. - 31 -
- Figura 9.** Vista longitudinal del puente extradosado modelo. - 36 -
- Figura 10.** Secciones transversales del tablero: a) Centro de luz y Dovela1, b) En Apoyo. - 37 -
- Figura 11.** Esquema de los tipos de vinculación entre el tablero y los pilares estudiados. - 38 -
- Figura 12.** Secciones transversales del pilar - 39 -

Figura 13. Líneas de influencia estudiadas para máximos momentos flectores en el tablero.	- 41 -
Figura 14. Líneas de influencia estudiadas para máximos esfuerzos axiales en los cables.	- 42 -
Figura 15. Hipótesis de carga viva adoptadas.	- 42 -
Figura 16. Elementos que conforman el modelo computacional.	- 43 -
Figura 17. Procedimiento utilizado para el cálculo de la fuerza en los tirantes	- 46 -
Figura 18. Influencia de la altura de pilono en el máximo esfuerzo axial de los tirantes.	- 49 -
Figura 19. Influencia de la distancia del pilono hasta el tirante en el número de cordones por tirante, para diversas alturas de pilono.	- 50 -
Figura 20. Influencia de la altura de pilono en el pretensionamiento promedio y número de cordones torales de los tirantes.	- 51 -
Figura 21. Influencia en la altura del pilono en la máxima oscilación de tensión de los tirantes	- 52 -
Figura 22. Alturas de pilono implementado en los puentes construidos hasta la fecha. [Benjumea, en proceso]	- 53 -
Figura 23. Deformada del tablero bajo cargas permanentes (CP) para diversas alturas de pilono.	- 54 -
Figura 24. Deformada del tablero por (CP+CV) para diversas alturas de pilono.	- 54 -

- Figura 25.** Influencia de la altura del pilono en la máxima flecha en el centro del vano central por sobrecarga. - 55 -
- Figura 26.** Diagrama de fuerzas axiales bajo el estado de CP para diversas alturas de pilono - 56 -
- Figura 27.** Diagrama de momentos flectores bajo el estado de CP para diversas alturas de pilono. - 57 -
- Figura 28.** Diagrama de momentos flectores bajo el estado de (CP+CV) para diversas alturas de pilono. - 57 -
- Figura 29.** Influencia de la altura del pilono en la máxima tensión en la fibra superior del tablero, en el vano central, vano lateral y sobre el apoyo de la pila. - 58 -
- Figura 30.** Influencia de la altura del pilono en la máxima tensión en la fibra inferior del tablero, en el vano central y vano lateral. - 59 -

GLOSARIO

ALAMBRE: Es el componente básico del cable de acero, el cual es fabricado en diversas calidades, según el uso al que se destine el cable final.

ALMA DEL CABLE: Es el eje central del cable donde se enrollan los tendones.

CABLE, TENDON, TIRANTE: Es el producto final que está formado por varios cordones, que son enrollados helicoidalmente alrededor del alma.

CORDÓN: Está formado por un número de alambres de acuerdo a su construcción, que son enrollados helicoidalmente alrededor de un centro, en una o varias capas.

ANCLAJE: Un dispositivo de conexión que une un objeto de concreto a una placa de metal para mantener la estructura en su lugar.

PILÓN, PILONO: Se dice en la arquitectura egipcia de un macizo de albañilería en forma de torre piramidal, con puerta en medio, cuya parte superior termina en terraza. Es la misma torre del puente.

CANTO: Altura propia de la sección del puente.

CARGA MUERTA: Se considera carga muerta el peso de la totalidad de la estructura incluyendo la capa de rodadura, barandas, ductos, cables y cualquier otro elemento. [AIS, 1995]

CARGA VIVA: La carga viva es el peso de las cargas móviles aplicadas de los vehículos y peatones. [AIS, 1995]

CARGAS DE SERVICIO: Son las cargas nominales o reales que no han sido afectadas por el factor de carga.

FATIGA: Se entiende por fatiga de un material el deterioro progresivo de su resistencia cuando se le somete a una serie de ciclos de carga y descarga. [Gonzales, 1997]

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL AL MODIFICAR LA ALTURA DEL PILONO EN UN PUENTE EXTRADOSADO DE LUZ CENTRAL IGUAL 100 m.*

AUTORES:

PEÑA BARRERA, Jhon Alexander.**

VARGAS AREVALO, Andrés Leonardo.**

PALABRAS CLAVES: Puente,extradosado, pilono, variación de tensión, fatiga, anclajes.

DESCRIPCION:

Los puentes extradosados son un tema de actualidad en el ámbito de la ingeniería de puentes a nivel mundial que han emergido como una nueva opción para puentes de luces medias. Mediante la utilización del hormigón y la tecnología del pretensado, se busca, en asociación con los tendones de acero como tirantes, plantear una solución marcadamente favorable hacia estas estructuras. La idea introducida por Mathivat en 1988, presenta una tipología estructural semejante a los puentes de tirantes pero con pilonos de menor altura y mayores cantos.

En este estudio se ha analizado el comportamiento estructural de un puente extradosado de luz central igual a 100 metros al modificar la altura del pilono. Esta tipología de puente ha despertado el interés de su implementación en Colombia, por ello en esta investigación se evaluó su comportamiento bajo el estado límite de servicio según el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, en la cual se determinó y cuantificó en qué medida la altura del pilono influye y condiciona el comportamiento del puente con pretensado extradosado, tipología que busca que la variación de tensión en el acero de los tendones extradosados, debida a la sobrecarga, sea lo suficientemente baja evitando los problemas de fatiga asociados a los anclajes y tendones existentes en un puente extradosado. Se realizó un análisis paramétrico donde se compararon las características más relevantes en el comportamiento estructural logrando concluir un rango en la altura óptima de pilono, la cual garantiza un mejor comportamiento estructural de los cables, y que es a la vez el rango de mayor uso en los puentes extradosados construidos hasta la fecha.

* Tesis de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director PhD. Gustavo Chio Cho

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL BEHAVIOR EVALUATION TO MODIFY THE HEIGHT OF PYLON IN AN EXTRADOSSED BRIDGES OF A CENTRAL SPAN EQUAL TO 100 METERS.*

AUTHORS:

PEÑA BARRERA, Jhon Alexander**

VARGAS AREVALO, Andrés Leonardo**

KEYWORDS: Bridge, extradosed, pylon, variation tension, fatigue, anchors

DESCRIPTION:

Extradosed bridges are actually topic in the field bridges engineering in the worldwide that have emerged as a new option for medium span bridges. Using the technology of concrete and prestressed, we seek, in association with steel tendons and strained, markedly raise a favorable solution to these structures. the idea introduced by mathivat in 1988, presents a structural typology like braces bridges but with lower height pylons and greater heights of boards.

In this study we have analyzed the structural performance a central span extradosedbridge just 100 meters change the height of the pylon. this type of bridge has attracted the interest of its implementation in Colombia, so therefore evaluated in this study their behavior under service limit state according to the Colombian Code Seismic Design of Bridges, in which it identifies and quantifies the extent of the pylon height influences and determines the behavior of prestressed bridge extradosed, typology for the variation of tension in the steel tendons extradosed due to overload, is low enough to avoid fatigue problems associated with existing anchors and tendons on a bridge extradosed. Parametric analysis was performed which compared the most relevant features in the structural behavior completing a range in the optimum height of pylon, which guarantees a better structural behavior of the cables, and that is at once the most widely used range extradosed bridges built to date.

* Thesis of grade

** Faculty of physical mechanical engineering. Civil engineering school. Director PhD. Gustavo ChioCho

INTRODUCCIÓN

Dentro del ámbito de la ingeniería donde los puentes extradadosos se han vuelto una nueva opción a causa de la experiencia a nivel mundial, usados especialmente en luces medias en diferentes formas y circunstancias habiendo sido estos una buena elección de solución, han despertado la inquietud sobre su posible implementación en Colombia, bajo las condiciones de las normas de puentes que se han establecido a lo largo de los años en nuestro país. Por lo anterior esta investigación busca realizar el estudio del comportamiento de un puente pretensado extradadoso, para el dimensionamiento bajo las condiciones de carga acordes a nuestro código, y así tener fundamentos investigativos en la correcta implementación de esta solución de puente.

Al momento de definir las dimensiones de un puente extradadoso, se busca tener las óptimas que me representen ventajas de diferentes puntos de vista, como la eficiencia de los materiales, comportamiento adecuado para el servicio que va a prestar, pero en especial la mayoría se centra en lo económico, por lo que buscar la optimización de esta eficiencia en cada elemento perteneciente al puente se vuelve el objetivo principal. Los elementos del puente pretensado extradadoso que son parte esencial en el análisis estructural son la altura de las torres, el canto del tablero, la distribución de los cables, la altura de la pila, el tipo de vinculación tablero-pila, entre otros.

La variación de cada uno de estos parámetros del puente ya mencionados genera cambios en la eficiencia de los otros por lo que esta investigación centra su atención en un modelo de características específicas donde se mantienen constantes las dimensiones en general, pero se varia el parámetro en estudio que

para nuestro caso será la altura de las torres la cual será variada, para poder observar cual altura de torre es la óptima.

Para definir la altura de torre óptima se tienen en cuenta las características del puente más representativas de su comportamiento como, flecha en centro de luz, máximos momentos en el tablero, esfuerzos internos del tablero, oscilaciones en los cables, entre otros. Estas características son el parámetro de comparación entre los diferentes casos de altura de torre siendo estos $H_p = 7.5 \text{ m}$, 10 m , 15 m y 20 m .

Una vez halladas cada una de las características de los puentes se realiza la comparación mediante gráficas y tabulaciones que permiten realizar de una forma adecuada y clara la evaluación del comportamiento estructural al modificar la altura del pilono en un puente extradadosado de luz central igual 100 m y lograr concluir cuál es la altura de pilono óptima.

1. EL PUENTE CON PRETENSADO EXTRADOSADO

Los puentes extradosados son un tema de actualidad en el ámbito de la ingeniería de puentes a nivel mundial que han emergido como una nueva opción para puentes de luces medias. Mediante la utilización del hormigón y la tecnología del pretensado, se busca, en asociación con los tendones de acero como tirantes, plantear una solución marcadamente favorable hacia estas estructuras. La idea introducida por Mathivat en 1988, presenta una tipología estructural semejante a los puentes de tirantes pero con una torre (pilono) de menor altura y mayores cantos [Chio, 2000], a través de la cual se ha visto un buen comportamiento estructural y una solución económica, ya que utiliza menor cantidad de material y tiene menor costo de construcción con respecto a un puente atirantado convencional. A partir de su configuración morfológica, los puentes extradosados son reconocidos como puentes intermedios entre los puentes atirantados y los de pretensado de viga cajón, Véase Figura 1. Una característica del puente extradosado es el pretensado en sus cables lo que lleva a alcanzar condiciones de servicio adecuadas.

Los pilonos se les construyen relativamente pequeños con la finalidad de que los cables no sufran (en gran medida) el efecto de fatiga, en comparación con los atirantados (torres mucho más grandes). Los cables se tensan con la finalidad de resistir el peso propio del tablero y alcanzar deformaciones cercanas a cero antes de ser sometido a las cargas de servicio.

Debido a que los puentes extradosados concurren en una zona intermedia entre los puentes pretensados y los atirantados, su comportamiento estructural puede asimilarse a una de estas tipologías, dependiendo de los criterios de diseño que

hayan sido adoptados en la fase de proyecto. En general, un puente extradosado de tablero rígido tendrá un comportamiento similar al de un puente pre tensado, logrando así evitar las altas oscilaciones de tensión en los tirantes y por consiguiente los problemas de fatiga asociados a los anclajes y tendones que se tendrían en un puente extradosado de tablero esbelto, cuyo comportamiento es más similar al de un puente atirantado.

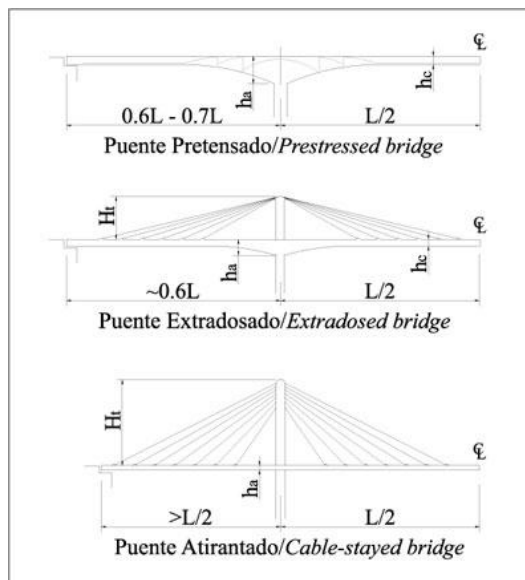


Figura 1. Comparación entre puentes pretensados, extradosados y atirantados.
[Benjumea,Chio& Maldonado, 2010]

En los puentes con pretensado extradosado, el pretensado es mixto, una parte es interno (dentro del canto) y el otro es extradosado. Cada uno de ellos tendrá características propias que las hacen diferenciable en su disposición como en su comportamiento dentro del puente.

Se podría inicialmente asumir que el concepto del puente con pretensado extradosado es algo completamente nuevo. Sin embargo, esto no es totalmente

cierto, su concepción y desarrollo puede seguirse desde la óptica del pretensado o la óptica constructiva.

En puente de tramo recto de hormigón pretensado, construido por voladizos sucesivos, se necesita una cantidad importante de pretensado interno superior para hacer frente a los momentos negativos que ocurren durante su construcción. Buscando una optimización de esto surgen los puentes de tirantes, donde el incremento importante de la excentricidad se materializa a través de las torres. Esta mayor eficiencia y optimización no es gratuita, conlleva altas variaciones de tensión frente a las sobrecargas y se requieren anclajes especiales resistentes a fatiga. Es así como surge la pregunta ¿Hasta que limite podemos forzar la excentricidad en el apoyo (altura de la torre) para que la respuesta de los tirantes no venga limitada por la fatiga, y puedan seguir utilizándose anclajes de pretensado convencional? Es pues, como respuesta a este reto, como se materializa el puente con pretensado extradadosado: un puente donde el pretensado exterior se lleva hasta el límite de sus posibilidades de trabajo como tirante, posibilidades que vienen coartadas por la resistencia a fatiga de sus anclajes convencionales.

Desde el punto de vista constructivo podría establecerse gracias a la construcción por voladizos sucesivos de determinados puentes de tramo recto. El problema que presentan estos puentes, es su enorme canto en arranques, necesario para hacer frente a los momentos negativos. Por ello en puentes de dos vanos, se ha recurrido algunas veces a atirantar durante la construcción, mediante tirantes provisionales, y así, reducir el canto de las secciones de apoyo de la pila, lo que conlleva a mejoras arquitectónicas importantes. Acabada la construcción, se desmontan los tirantes provisionales y aquí, en algún momento, los ingenieros japoneses se preguntaron: ¿Y si dejamos estos tirantes en el puente para siempre? La respuesta a esta pregunta es el puente con pretensado extradadosado.

Con base a los puentes extradosados construidos hasta la fecha, o los proyectados como el viaducto de Teror, ver figura 2, se ha demostrado que esta tipología estructural representa una solución viable desde el punto de vista práctico y económico a la hora de construir puentes de luces medias.



Figura 2. Puente con pretensado extradosado (Viaducto de Teror, Gran Canaria, España).

Tomado de <http://www.eipsa.net/documentos/imagenes/573.jpg>

El concepto de puente extradosado según Kasuga (2002), se basa en la consideración, de que tanto los puentes con pretensado extradosado como los puentes atirantados pertenecen a una misma categoría de puentes reforzados por tirantes. Su diferencia se presenta en la determinación de cuales de sus elementos estructurales constituyentes llevarían más carga viva, los tirantes o el tablero.

La importancia de los puentes extradosados radica en su capacidad para asociar características de puentes atirantados con puentes convencionales de viga cajón. Considerándose como un híbrido entre estos dos sistemas de puentes. Esta aseveración se afirma también desde el punto de vista de la cantidad de

materiales requeridos, tal como se observa en la Figura 3, donde Mermigas (2008) comparó el espesor promedio de concreto (volumen de concreto de la viga/área del tablero), para puentes atirantados, extradosados y puentes de viga cajón pretensados construidos por voladizos sucesivos, encontrando que el consumo de los materiales principales de los puentes extradosados, recae en una zona intermedia entre las otras dos tipologías. Además, para un tramo principal entre 80 y 100 metros, puede haber muy poca diferencia entre el espesor promedio de un puente viga cajón y un puente extradosado, pero la diferencia se incrementa rápidamente, lo que indica un mayor ahorro en hormigón con un puente extradosado a medida que aumenta la luz principal.

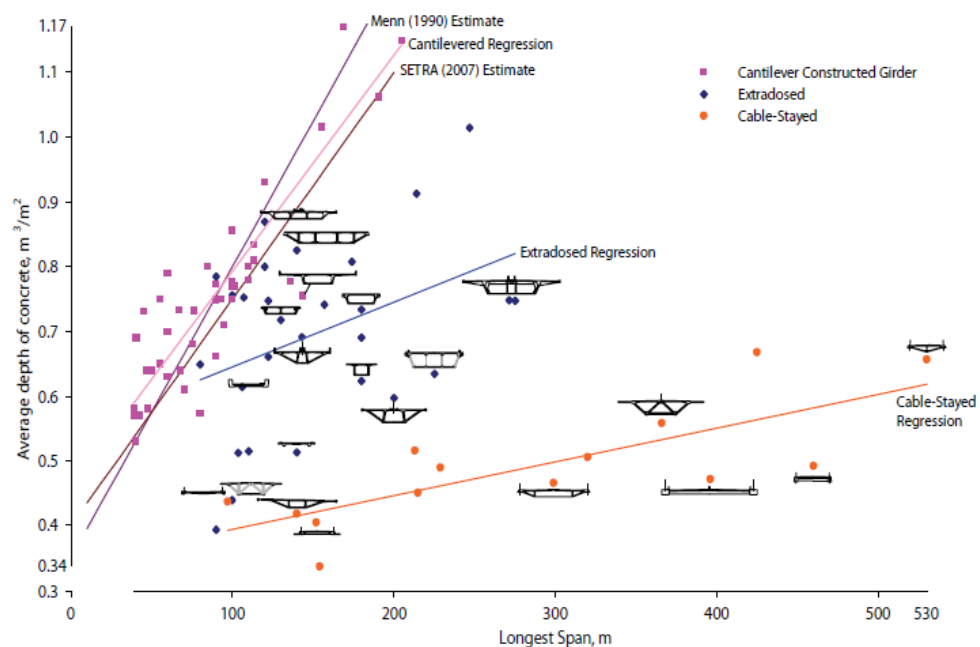


Figura 3. Comparación del consumo de materiales para puentes pretensados construidos por voladizos sucesivos, extradosados y atirantados. Espesor promedio de concreto. [Mermigas, 2008]

Con los puentes atirantados las diferencias morfológicas son:

- La altura de la torre, ya que los puentes extradados poseen torres más bajas que los puentes atirantados. En particular, la altura de la torre es la mitad de la altura óptima de los puentes atirantados.
- La altura del tablero, ya que los puentes extradados tiene tableros de mayor altura que los de los puentes atirantados, proporcionando de esta manera una mayor rigidez.

El hecho de que en los puentes extradados la torre sea baja, hace que los cables que salen de ella lleguen al tablero a una distancia más alejada, haciendo que el ángulo formado sea más cerrado y permitiendo de esta manera que las tensiones producidas en los cables actúen más a comprimir el tablero horizontalmente cerca de los apoyos, que a soportar las cargas verticales. Esta es la razón por la que los cables actúan como un pretensado externo para un tablero de hormigón. La alta rigidez y continuidad de tablero, permite que este llegue a comportarse como una viga continua. Esta característica, es la que hace que estos puentes se asemejen a los puentes de tramo recto de hormigón pretensado.

En los puentes extradados, el atirantamiento sirve para compensar en gran parte los esfuerzos de peso propio. La baja relación alturapilono/luz del vano hace que la efectividad de los tirantes sea reducida. Sin embargo, la escasa variación de tensión de los tirantes permite que estos queden menos afectados por los fenómenos de fatiga y que por lo tanto, se puedan aprovechar mejor, llegando a estados de tensión más altos que los permitidos para tirantes convencionales y teniendo una ventaja adicional consistente en utilizar anclajes más sencillos que los específicos para puentes atirantados [Llombart y Fort, 2005], ya que los puentes atirantados pueden diseñarse para esfuerzos admisibles menores o iguales al 40% del esfuerzo ultimo ($f_{adm} \leq 0,4f_{pu}$), mientras que el de los puentes

extradosados se diseñan para esfuerzos admisibles menores o iguales al 60% del esfuerzo ultimo ($f_{adm} \leq 0,6f_{pu}$).

1.1 CONFIGURACION MORFOLOGICA DEL PUENTE EXTRADOSADO MODELO

Los puentes extradosados, pueden presentar diferentes configuraciones reflejadas en variaciones tales como el tipo de tablero, disposición de los cables extradosados y geometría de las torres; adaptándose con ello a los diferentes requerimientos y necesidades de cada proyecto.

Su configuración geométrica, puede estar condicionada principalmente a características propias de la zona en la cual se construirá, como lo son la topografía y la geotecnia entre otras; así como también a disposiciones arquitectónicas y aspectos estéticos del mismo.

A continuación se muestran algunas de las configuraciones más empleadas en puentes extradosados construidos en lo que respecta a disposiciones de cableado extradosado, configuración de la torre, anclaje de los cables en las torres y tirantes.¹

¹ISHII, Marcio. Sistemas estruturais de pontes extradosado. Tesis de Maestría. Universidad de São Paulo. São Paulo, 2006.

Configuraciones típicas de los cables extradados

Estas configuraciones se establecen según la disposición de los tirantes tanto en plano longitudinal como transversal.

- **Configuración longitudinal de los cables extradados.**

Tipo Abanico: Se caracteriza porque los cables están anclados a lo largo del tablero y fijos en la parte superior de la torre. Esta forma de disponer los tirantes extradados es la más empleada ya que la excentricidad de los cables se maximiza, aumentando su eficiencia. Un ejemplo claro de este tipo de configuración es el puente Odawara Blue Way en Japon. Véase Figura 4.



Figura 4. Puente Odawara Blue Way, Japón. Tomado de <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=41476>

- **Configuración transversal de los cables extradosados.**

Sistema con suspensión múltiple: El sistema de suspensión se distribuye en dos o más planos anclados a las torres y a lo largo de los bordes del tablero en la mayoría de los casos. Estructuralmente, esta configuración genera mayor rigidez transversal, reduciendo los efectos dinámicos en la estructura productos de la acción del viento y de eventos sísmicos. Adicionalmente y como producto de lo anterior, los esfuerzos por torsión se reducen, lo cual posibilita el empleo de secciones de tablero con menor altura. Véase Figura 5.



Figura 5. Puente Integração Brasil-Perú, Brasil. Tomado de <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=50670>

- **Configuración de la torre**

Una torre es un elemento estructural que genera la excentricidad de los cables extradados. Su altura está dada en función de la luz a vencer y su configuración geométrica en gran parte depende de las condiciones propias de cada proyecto.

Torres con doble mástil: Son implementados para soportar tableros con cableado extradado lateral. Véase Figura 6.

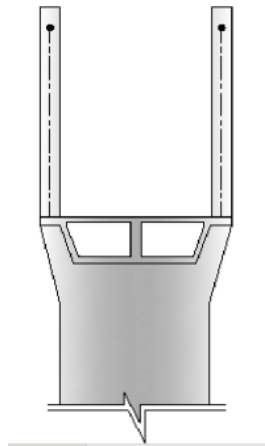


Figura 6. Configuración de torre. Mástiles en “Y”.

- **Anclaje de los cables en las torres**

La utilización de sillas en la torres es el método más utilizado en los puentes extradados. Esta configuración aumenta la eficiencia del sistema de pretensado. Véase figura 7.

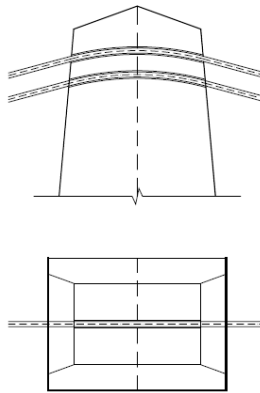


Figura 7. Anclajes a través de sillas

1.2 TIRANTES

Los tirantes o cables de los puentes con pretensado extradadoso son tendones conformados por un conjunto de cordones de preesfuerzo dispuesto en forma paralela. Véase Figura 8.

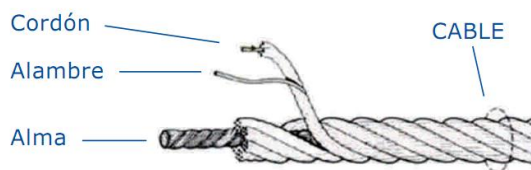


Figura 8. Elementos que constituyen un cable. Tomado de http://www.indeli.cl/catalogos/cat_cables_acero.pdf

La protección contra corrosión de los tirantes es indispensable en los puentes extradadosos, ya que la corrosión de estos puede ocasionar el colapso de toda la estructura.

La utilización de varias barreras de protección de los cordones (por ejemplo, galvanizado, revestimiento epoxi, vaina de polietileno) permite no solamente hacer

frente a los ataques físicos y químicos del medio ambiente sino, también disminuir o anular el efecto de los daños que pueden ocasionar la fatiga por corrosión o por rozamiento, tal como se ha usado en los puentes con pretensado extradadosado construidos.

1.3LA FATIGA EN EL SISTEMA DE ATIRANTAMIENTO DE UN PUENTE CON PRETENSADO EXTRADOSADO.

Como una característica relevante en los puentes con pretensado extradadosado podemos enunciar que es la altura de la torre quien controla, en primera aproximación, la aparición de problemas de fatiga frente a la sobrecarga, al tener limitado el valor de la máxima oscilación de tensión en los tirantes por el tipo de anclaje utilizado.

La repetición de las cargas produce prematuros deterioros de las propiedades mecánicas de los materiales, siendo conocido este fenómeno como “daño por fatiga”. Las partes particularmente más comprometidas del acero de los tirantes son, más que la longitud libre, los extremos de los mismos y el interior de los anclajes.

Los puentes con pretensado extradadosado construido hasta la presente fecha se caracterizan por unos menores costos originados, en parte, por la utilización de la tecnología de tendones actualmente utilizada en el pretensado interno no adherente y el pretensado exterior. Esto es posible gracias a que la sobrecarga de servicio produce pequeñas fluctuaciones de tensión en los puentes con pretensado extradadosado, al contrario de lo que ocurre en un puente atirantado convencional. La disminución substancial en la máxima oscilación de tensión en el

sistema de anclaje permite no tener que utilizar los costosos sistemas que se utilizan en los puentes atirantados convencionales y que están gobernados por el fenómeno de fatiga.

La tendencia en la construcción de los puentes con pretensado extradadosado es la eliminación de los anclajes en la torre y la colocación en su lugar de una silla de anclaje que permite el paso del tirante y su reemplazo futuro en caso de necesidad. En este sistema la sobrecarga de servicio produce pequeñas oscilaciones de tensión en los tirantes y sus anclajes y, aunque son pequeñas se debe fijar un límite admisible para dichas oscilaciones de tensión. Mediante la utilización de una silla se puede obtener una situación de apoyo deslizante, donde hay un posible deslizamiento y una alta concentración de esfuerzos entre la superficie de contacto de la silla y los cables, lo cual puede originar posibles problemas de desgaste por el rozamiento continuo y oscilante entre las superficies en contacto de ambos elementos. Este fenómeno físico de rozamiento y desgaste, conocido como "fretting", puede ocasionarnos problemas adicionales de fatiga y corrosión.

Cuando se consideran que los tirantes pasan a través de una silla por la cima de la torre y se utiliza la tecnología de los cables y anclajes utilizada en el pretensado exterior, el límite máximo permisible para evitar fatiga por rozamiento y por tensión es de 5 kg/mm^2 [Dos Santos, 2006].

2. NECESIDAD DEL ESTUDIO

Cuando se diseña un puente, la primera pregunta a resolver es; ¿Qué tipología es conveniente construir?, para ello se dispone de un mar de tipologías clásicas, donde de forma aceptable, se conoce el rango de aplicabilidad de cada una de ellas. Luego desde el punto de vista del diseño, pueden existir diversas posibilidades y, por ello, se debe conjugar diversos aspectos para lograr un diseño adecuado, desde la capacidad creativa del diseñador, hasta el conocimiento que se tenga del uso adecuado de los materiales para lograr un diseño aceptable.

Actualmente con los puentes con pretensado extradadoso son más las dudas que respuestas que se tienen respecto a su tipología. Debido a esto se desconoce en gran medida, los criterios óptimos de diseño que deben emplearse en el proyecto de estos puentes. Hasta el momento, se pueden vislumbrar, de la información disponible, posibles datos del comportamiento de estos puentes bajo circunstancias específicas. No obstante, la mayoría de la información necesaria y realmente útil para el diseñador es desconocida, ya que esta tipología de puente es realmente nueva. De acuerdo con lo expresado es donde surgen el interrogante de ¿Qué altura óptima debe tener el pilono para que la variación de tensión en el acero de los tendones extradadosos, sea lo suficientemente baja, bajo las condiciones de diseño del actual del código colombiano de diseño sísmico de puentes? De aquí la búsqueda a la respuesta a este interrogante es lo que ha incentivado el desarrollo de esta investigación, en la cual se pretende determinar y cuantificar en qué medida la altura del pilono influye y condiciona el comportamiento del con pretensado extradadoso.

3. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la realización de esta investigación se inició recopilando información relacionada con los puentes con pretensado extradadosado. Parte de la revisión hecha se encuentra en los capítulos anteriores. La revisión se inició con el estudio de artículos y tesis donde se plantea la idea inicial de estos puentes, sus características más relevantes, ventajas y desventajas. El análisis de la información tenía como objeto hallar un indicio a la pregunta planteada en esta investigación. Así, el parámetro analizado es la altura de la torre (pilono).

Además se estudió la información actualmente disponible acerca de los tendones, utilizados en pretensado interno y externo, como su área transversal, límite admisible a tracción y a fatiga.

3.1 DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL MODELO ANALIZADO.

- **Geometría del puente extradadosado estudiado**

La geometría del puente modelo se ha definido a partir de las propuestas de diseño recomendadas en [Chio, 2000]. El puente tiene una longitud total de 220 m, conformado por una luz principal de 100 m y dos vanos laterales de 60 m, que corresponden al 60% de la longitud del vano principal. Véase Figura 9.

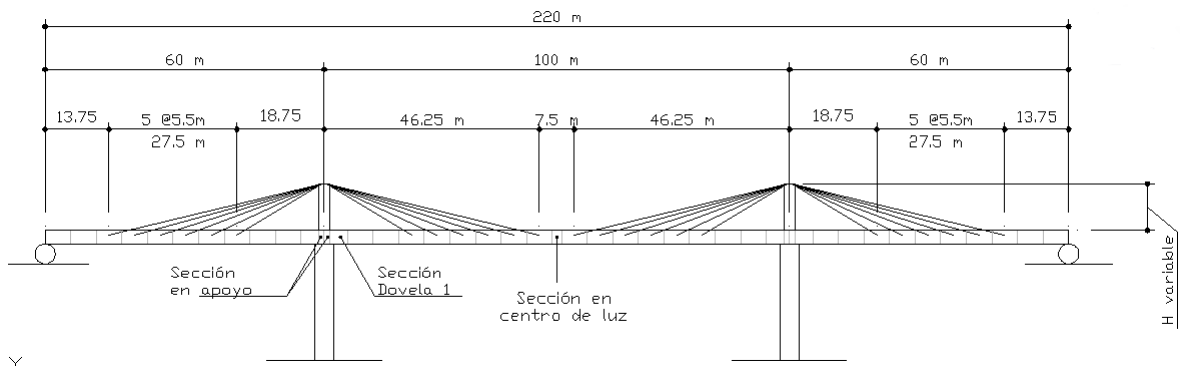
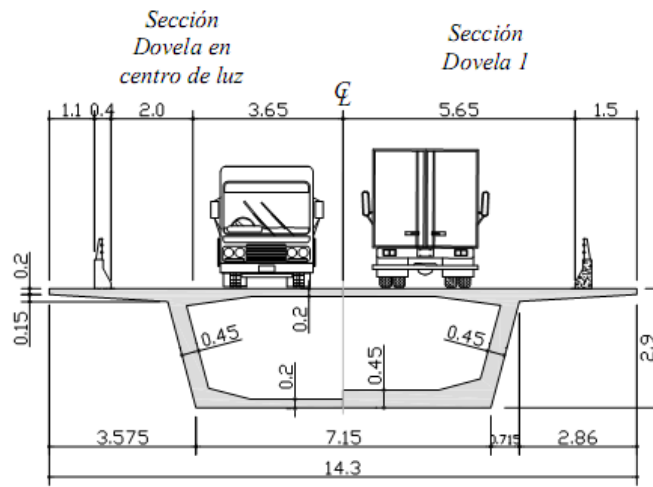


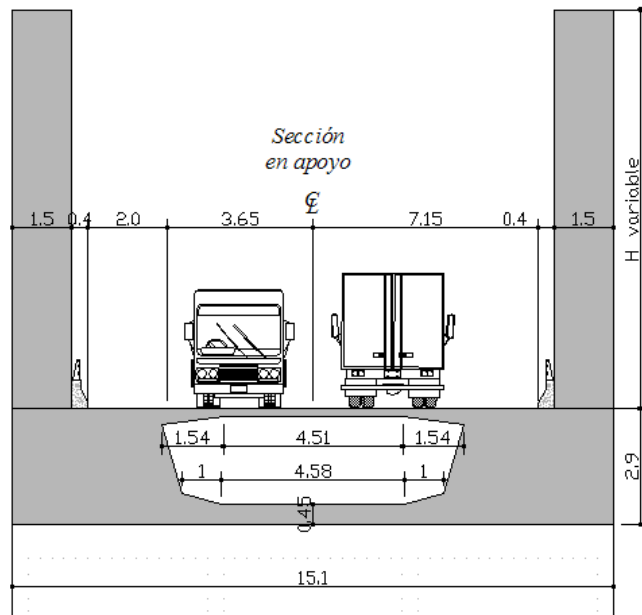
Figura 9. Vista longitudinal del puente extradosado modelo. [Benjumea, en proceso]

El tablero consiste en una sección tipo cajón unicelular con voladizos, de canto constante igual a 2.9 m (esbeltez $L/34$) y ancho 14.30 m. El espesor de la losa inferior se ha modificado a lo largo del puente mediante interpolación lineal entre la sección en el centro del vano principal y una dovela posterior a la dovela en apoyo (Dovela 1). Para la dovela en apoyo, se ha empleado una sección maciza con pasahombres en su centro. Véase Figura 10.

Las torres consisten en elementos de sección transversal rectangular de 3×1.5 m, con la mayor dimensión en la dirección longitudinal del puente, donde su altura fue modificada en cuatro casos de estudio, a saber, 7.5 m, 10 m, 15 m y 20 m, medidos desde el tablero hasta la coronación, con lo cual se tiene una relación H/L igual a 0.075, 0.10, 0.15 y 0.20, siendo L la longitud del vano central. En todos los casos se ha supuesto que las torres se encuentran unidas rígidamente al tablero.



a)



b)

Figura 10. Secciones transversales del tablero: a) Centro de luz y Dovela1, b) En Apoyo.
[Benjumea, en proceso]

Se han empleado dos planos de cables extradados, cada uno compuesto por 6 parejas de cables que pasan por sillas de anclaje ubicadas en la cima de la torre, las cuales impiden cualquier desplazamiento después de haber sido tensionado cada tirante. Los cables se anclan en su extremo inferior sobre en el tablero, conformando una disposición en “abanico”, según la terminología utilizada para puentes atirantados convencionales. El primer cable se ancla a 18.75 m a partir del eje de la torre, ya que la colocación a menos de 18 m a partir del eje de la torres es ineficiente [Chio, 2000], y luego cada 5.5 m los cables restantes.

El puente está apoyado en sus extremos izquierdo y derecho, sobre los estribos, permitiendo solo movimientos traslacionales en la dirección longitudinal. Los pilares se encuentran empotrados en la cimentación, y en la corona el tipo de vinculación con el tablero, se consideró empotrado. Véase Figura 11.

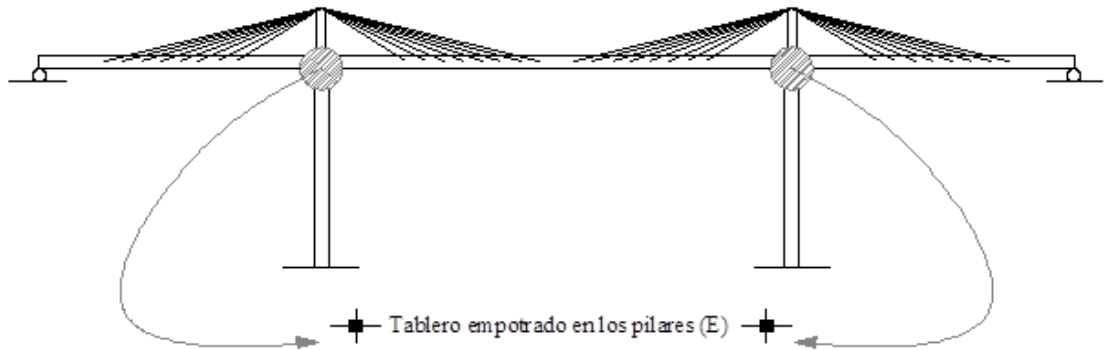


Figura 11. Esquema de los tipos de vinculación entre el tablero y los pilares estudiados.

Los pilares tienen una altura es de 12m, la sección transversal de los pilares se presentan en la figura 12.

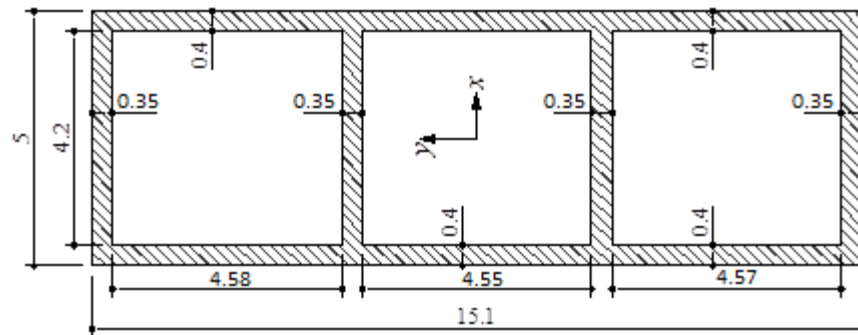


Figura 12. Secciones transversales del pilar

- **Materiales.**

Las propiedades mecánicas para el concreto del tablero, las torres y los pilares son: $f'c = 4000 \text{ Ton}/\text{m}^2$, $E_c = 2600000 \text{ Ton}/\text{m}^2$, relación de Poisson $\nu = 0.2$ y peso específico $\gamma = 2.4 \text{ Ton}/\text{m}^3$. Los esfuerzos admisibles a tensión y compresión después de que ocurren las pérdidas dependientes del tiempo son de $1.6\sqrt{f'c}$ y $0.4f'c$ respectivamente.

Para el acero de los cables extradosados, se emplearon cordones de diámetro 0.6", ofrecidos por la VSL (Post-Tensioning & Specialty Reinforcement Systems), con las siguientes propiedades: $f_{pu} = 189667,21 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$, $f_{py} = 170700,49 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$, $E_{ps} = 20389019 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$, peso específico $\gamma_{ps} = 7.866 \text{ Ton}/\text{m}^3$ y coeficiente de expansión térmica $\alpha = 1.17 * 10^{-5}$.

Para acabados, los materiales asimilados son asfalto de peso específico $\gamma = 2.2 \text{ Ton}/\text{m}^3$ y barandas de un material de peso específico máximo $\gamma = 0.1 \text{ Ton}/\text{m}$

- **Acciones**

Para un análisis estático del comportamiento estructural en cada caso estudiado se tomaron las siguientes acciones:

Cargas permanentes (CP): Consisten en el peso propio de los elementos estructurales y una carga distribuida igual a $2,363 \text{ tn/m}$ debido a los elementos no estructurales (acabados) en el tablero, la cual considera : Capa de rodadura de asfalto, separadores en concreto , barandas.

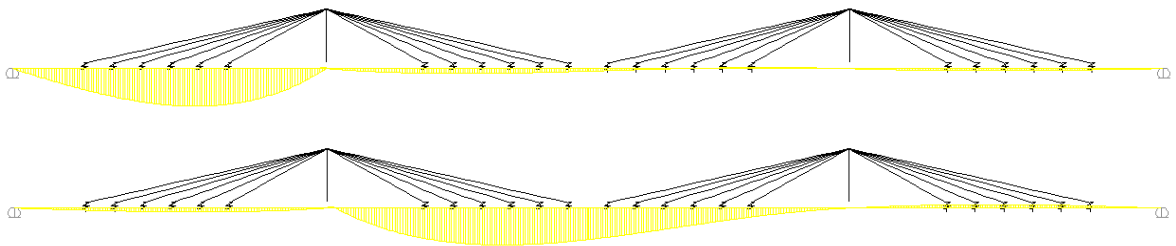
Carga viva (CV): es la definida en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP 200-95) que es equivalente a trenes de camiones a lo largo del puente, representada por líneas de carga considerada en esta investigación como carga de vía, que consiste en una carga uniforme por metro lineal de carril igual a $1,14 \text{ tn/m}$ una carga concentrada de 12 tn por carril teniendo en cuenta que para el modelo estudiado se consideran 3 carriles .Según el numeral A.3.4.6.2 estas cargas se posicionaran de tal forma que generen los máximos esfuerzos en los elementos estudiados, por lo cual basados en un análisis en una superposición de líneas influencia mostradas en la figura 13 y 14 se plantean las hipótesis mostradas en la figura 15 descritas a continuación:

Hipótesis 1: Es el caso de carga donde se presenta el mayor momento en el centro de luz del vano central (mayor momento positivo) y la mayor deflexión del vano central.

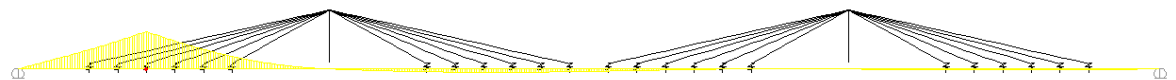
Hipótesis 2: Es el caso de carga donde se presenta el mayor momento en el centro de luz de los vanos laterales (mayor momento positivo) y mayor deflexión de los vanos laterales.

Hipótesis 3 y 4: Es el caso de carga donde se presenta la mayor sollicitación en los tirantes y aumenta el momento negativo en los pilares.

Para momento negativo en la zona de apoyo sobre pilares



Para momento positivo en el vano lateral



Para momento positivo en el centro de luz

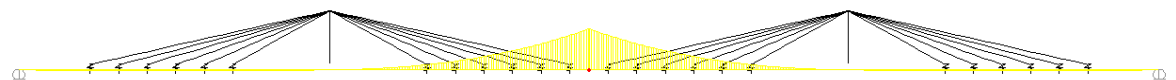
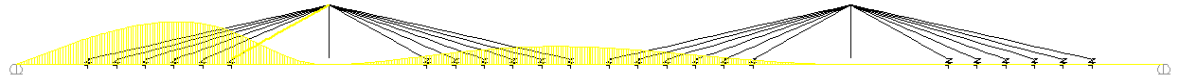


Figura 13. Líneas de influencia estudiadas para máximos momentos flectores en el tablero.

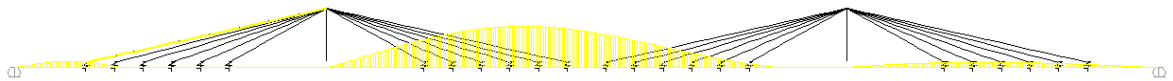
Para axial en cable a 18.75 m medidos desde el pilono en el vano lateral



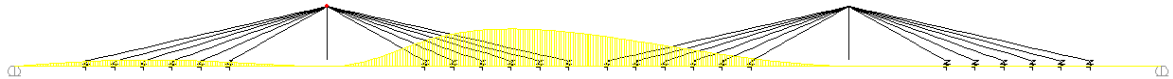
Para axial en cable a 29.75 m medidos desde el pilono en el vano lateral



Para axial en cable a 40.75 m medidos desde el pilono en el vano lateral



Para axial en cable a 18.75 m medidos desde el pilono en el vano central



Para axial en cable a 29.75 m medidos desde el pilono en el vano central



Para axial en cable a 40.75 m medidos desde el pilono en el vano central

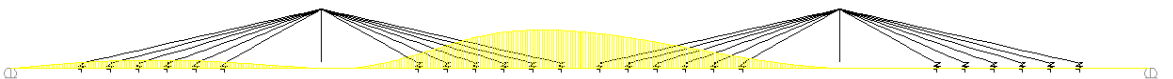


Figura 14. Líneas de influencia estudiadas para máximos esfuerzos axiales en los cables.

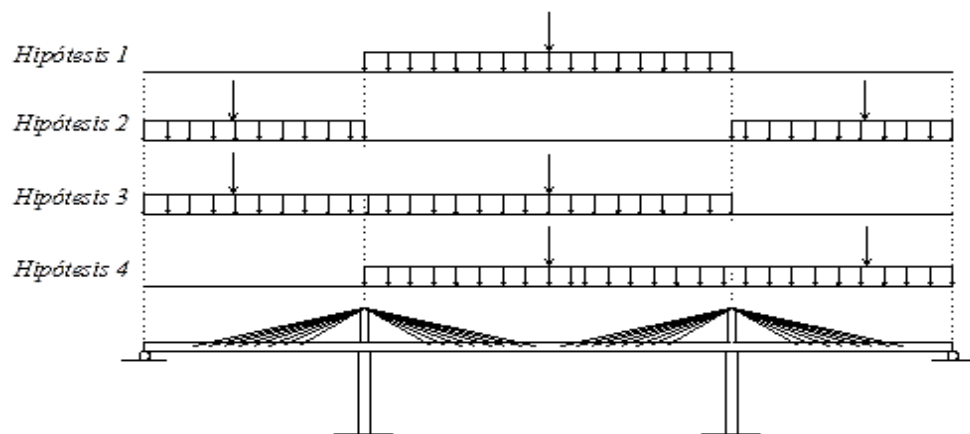


Figura 15. Hipótesis de carga viva adoptadas.

3.2 MODELO NUMERICO

Una vez planteado los parámetros generales del puente a analizar antes descritos como geometría, secciones, límites de diseño en los cables, acciones a las que se ve sometido, se describe en general los criterios de construcción usados en el modelo computacional mediante un esquema de líneas y puntos, que sea acorde al modelo analizado, para realizar un estudio óptimo del comportamiento de un puente extradosado de luz central igual a 100 m. Los elementos que conforman el modelo computacional desarrollado empleado el software comercial SAP2000Advanced v.14 ® se ilustran en la figura 16.

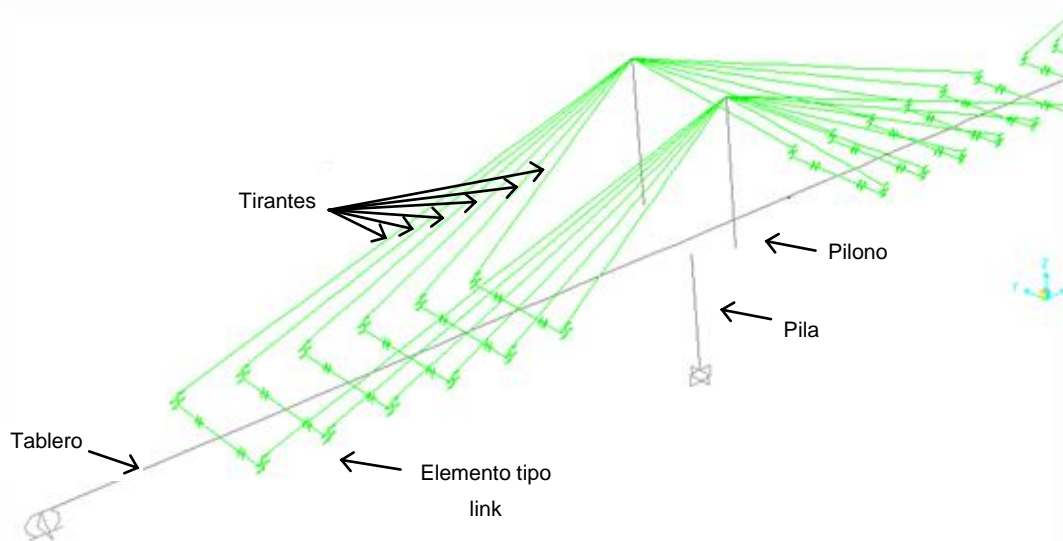


Figura 16. Elementos que conforman el modelo numérico.

Material

El material se asume de propiedades de tipo isotrópico, densidad constante, elástico y trabajando en el rango lineal. El material es de tipo concreto y acero con sus respectivas propiedades mecánicas descritas en el apartado 3.1.

Tablero

Se modelo mediante una serie elementos tipo “frame” que representan cada dovela con su respectiva sección tipo “General” a las que se le asignaron las propiedades necesarias de las cuales algunas son; la inerciacentroidal en sus diferentes ejes, área de cortante, constante torsional, área de la sección transversal, previamente calculadas de las secciones tipo cajón de dimensiones inicialmente definidas, para mantener la geometría del puente y lograr el efecto del tablero a los cables de forma adecuada se crearon elementos tipo link (rigidez infinita y masa nula) que representan el cuerpo del tablero.

Pilono

Las torres se modelaron con elementos tipo “frame” con su respectiva sección rectangular. Para unir la parte inferior de la torre con el tablero se asignaron a los nodos un “Constraints” tipo “Equal” el cual representa la unión de estos puntos como un solo elemento. Para la parte superior se modelaron los cables saliendo del mismo punto representando la silla de anclaje sobre la que se apoyan los cables.

Cables

El cable es creado con elementos tipo “Cable” para representar la resistencia únicamente a fuerzas de tensión, con sus propiedades del material acero y el comportamiento del cable ante las fuerzas se define de tipo “undeformedlength”.

Pila

La pila se modelo con elemento tipo “frame” con su respectiva sección rectangular hueca. Para unir la parte superior de la pila con el tablero se le asignó a los nodos un “Constraints” tipo “Equal” el cual representa la unión de estos puntos como un solo elemento. Para la parte inferior se modelo un apoyo empotrado.

3.3 DIMENSIONAMIENTO Y PRETENSIONAMIENTO DE LOS CABLES

El dimensionamiento de los tirantes se hace en la hipótesis de que en una sola fase de construcción, las fuerzas de pretensado de los tirantes compensan totalmente las cargas de peso propio y cargas permanentes de la superestructura en el vano central o en otras palabras, obtener una deformada aproximadamente nula. En los puentes extradosados importante limitar la deformación a través de la esbeltez del tablero, ya que a su vez, se acota la máxima oscilación de tensión en los tirantes, caso contrario a lo que ocurre en un puente atirantado donde lo importante es limitar la curvatura del dintel [Leonhardt et al., 1970].

El área de los tirantes se dimensiona de igual manera como se hace en un pre diseño de un puente atirantado [Walther et al., 1985], donde se sustituyen cada uno de los anclajes de los tirantes sobre el tablero por un apoyo simplemente articulado que restringe el desplazamiento vertical a cero, determinando la fuerza del tirante tal que su componente vertical relacionada a la inclinación del cable, sea igual a la reacción obtenida. Véase figura 17. Además, se considera una máxima tensión admisible del acero del tirante igual a $0,6 \cdot f_{pu}$, siendo f_{pu} la resistencia última del tirante. Este límite ha sido considerado en base al límite actualmente en uso para la tecnología del pretensado exterior o no adherente.

Una vez obtenida el área de los tirantes con los criterios anteriormente descritos, se adopta un área comercial ofrecida por VSL que bajo la máxima tensión soportada no sobrepase el límite de tensión admisible.

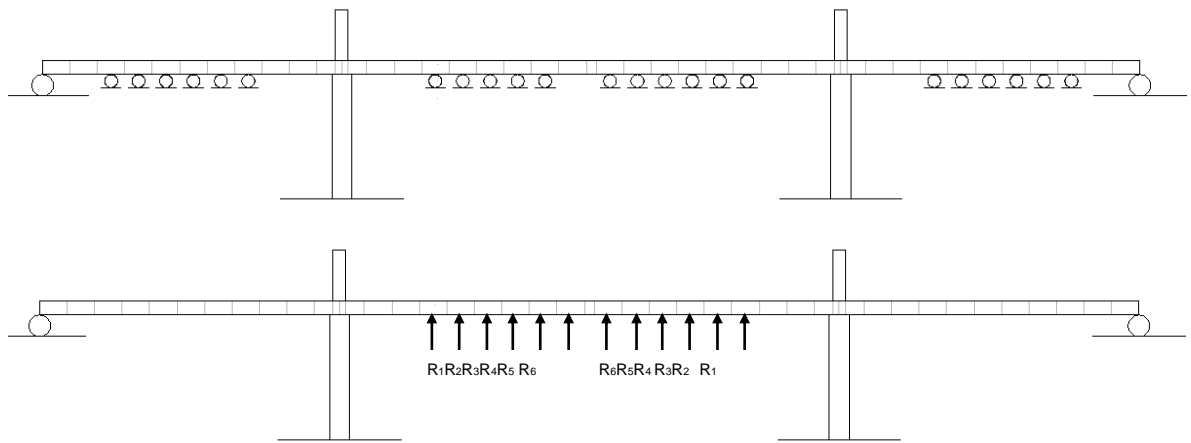


Figura 17. Procedimiento utilizado para el cálculo de la fuerza en los tirantes

Para modelar adecuadamente la fuerza de pretensionamiento en los cables en el SAP2000Advanced v.14 ®. fue necesario aplicar diferenciales de temperatura a cada tirante según sus propiedades, que generan una fuerza debido a la deformación del tirante equivalente a la fuerza de pretensionamiento. Esto se hace usando la compatibilidad de desplazamientos frente a cargas axiales y acciones térmicas, de acuerdo a la ecuación 1.

$$\Delta T = \frac{T}{A * E * \alpha} \quad (1)$$

Dónde:

ΔT → Delta de temperatura.

A → Área

E → Modulo de elasticidad

α → Coeficiente de expansión térmica

3.4 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Se ha realizado un estudio paramétrico que se llevó a cabo variando la altura de la torre y se ha centrado en analizar los aspectos considerados más ilustrativos del comportamiento estructural de estos puentes frente a la carga de vía del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP 200-95). Así, las respuestas analizadas han sido la **flecha del tablero, la oscilación de tensión de los tirantes debido a la carga de vía, esfuerzos axiales en los tirantes, el diagrama de momentos flectores del tablero, diagrama de fuerzas axiales en el tablero, diagrama de esfuerzos normales del tablero.**

Para evitar los problemas de fatiga asociados a los cables extradados, se han seguido las recomendaciones del Dos Santos (2006), quien aclama es favorable adoptar una variación de tensión máxima en los tirantes de 5 kg/mm² para puentes extradados.²

El análisis de los puentes estudiados consiste en los siguientes pasos:

- Aplicación de la tensión en los cables.
- Aplicación de las cargas permanentes y de la carga vía sobre el tablero.
- Obtención de momentos flectores, cargas axiales y esfuerzos normales en el tablero.
- Obtención de la variación de tensión en los tirantes.

²BENJUMEA, José; CHIO, Gustavo; MALDONADO, Esperanza. Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes extradados: visión general y estado del arte. Revista Ingeniería de construcción. 2010.

4. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL AL MODIFICAR LA ALTURA DEL PILONO.

Considerando como base el puente descrito en el apartado 3.1, de una longitud total de 220m, conformado por una luz central de 100m y dos vanos laterales de 60m, que corresponden al 60% de la longitud del vano principal de luz central, el estudio paramétrico se inició variando la altura del pilono de un puente extradosado. La Tabla 1 ilustra los casos analizados y la característica modificada.

Caso	Altura torre H[m]
pe0.075	7.5
pe0.1	10
pe0.15	15
pe0.2	20

Tabla 1. Casos estudiados al variar la altura del pilono.

Las conclusiones más relevantes extraídas del análisis de los resultados son:

4.1 INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LA ALTURA DEL PILONO EN LAS CARACTERISTICAS Y TENSIONES DE LOS TIRANTES.

- Para los puentes analizados, la máxima tensión admisible del acero de los tirantes es igual a $0,6 \cdot f_{pu}$, siendo f_{pu} la resistencia última del tirante. Este límite ha sido considerado en base al límite actualmente en uso para la tecnología del pretensado exterior o no adherente, se encontró que los máximos esfuerzos axiales en los tirantes son 54,09% y 56,11% de f_{pu} , debido a los casos de cargas

CP y CP+CV respectivamente, donde ninguno de ellos sobrepasa el máximo esfuerzo axial admisible ($60\% f_{pu}$). En todos los casos analizados se encontró un menor esfuerzo axial para la altura de pilono de 10 m ($H/L=0,10$). Véase figura 18. Véase columna (4) y (5) de la tabla 2.

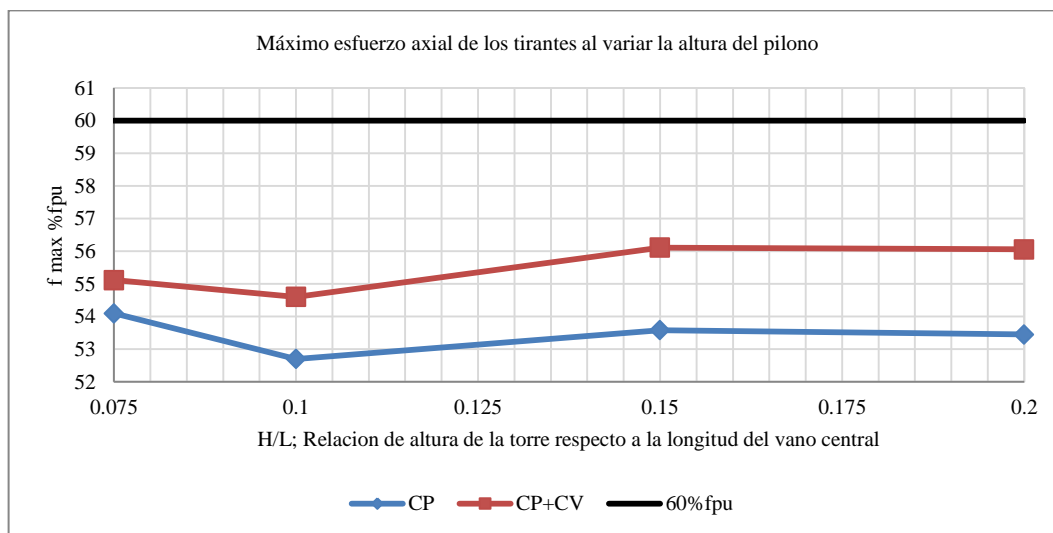


Figura 18. Influencia de la altura de pilono en el máximo esfuerzo axial de los tirantes.

Caso	(1) (2) (3) Numero de cordones			(4) (5) Axial en el tirante		(6) Pretensionamiento promedio [tn]
	Mínimo # de cordones 140 mm ²	Máximo # de cordones 140 mm ²	Total cordones	σ_{CP} máx.	σ_{CP+CV} máx.	
pe0.075	5	31	120	54,09	55,12	283,76
pe0.1	4	25	95	52,70	54,60	220,37
pe0.15	3	19	67	53,58	56,11	158,26
pe0.2	2	17	56	53,45	56,06	128,81

Tabla 2. Características y comportamiento de los tirantes al variar la altura del pilono

- Como se observa en la figura 19, el número de cordones promedio del segundo tirante, ubicado a 24.25 metros medidos desde el pilono, disminuye en promedio un 85% respecto al primer tirante ubicado a 18.75 metros medidos desde el pilono. Entendiendo el número cordones promedio como la media de los cordones de los tirantes 1 a 6 para cada caso estudiado. Por ejemplo, para los puentes con la relación $H/L=0,15$, en el primer tirante se utilizan 19 cordones mientras en el segundo tirante solo fueron necesarios 3 cordones, debido a que el primer tirante tiene una mayor fuerza de presolicitación conlleva a que la fuerza de presolicitación en el segundo tirante disminuya drásticamente. Véase columna (1) y (2) de la tabla 2.

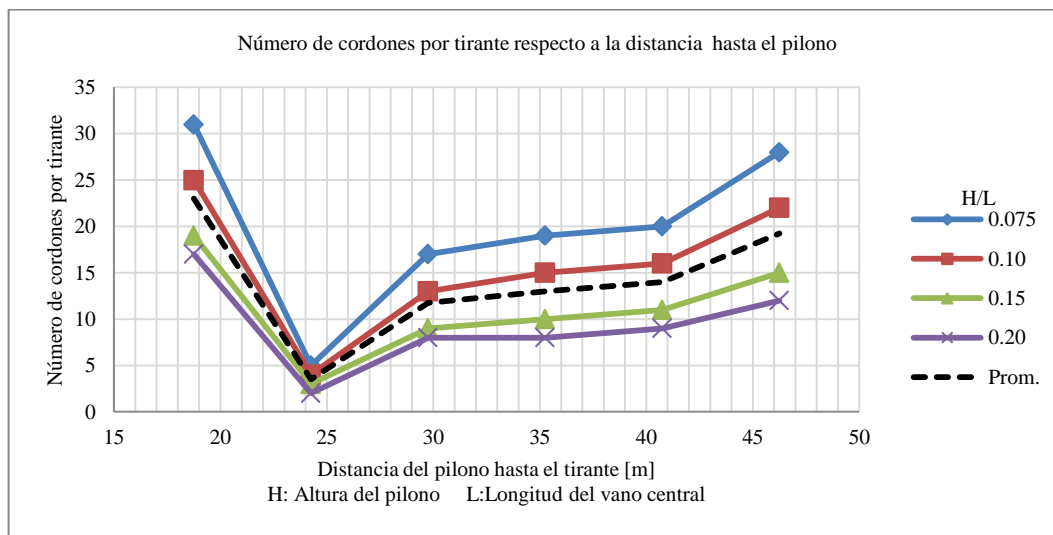


Figura 19. Influencia de la distancia del pilono hasta el tirante en el número de cordones por tirante, para diversas alturas de pilono.

- El aumento del número de cordones totales y de la fuerza promedio de presolicitación en los cables, al disminuir la altura del pilono se debe a la menor eficacia de los tirantes para lograr una deformada nula bajo el estado de carga

permanente. Pero este aumento puede ser compensado con una menor oscilación de tensión en los tirantes. Véase columna (3) y (6) de la tabla 2. Véase figura 20.

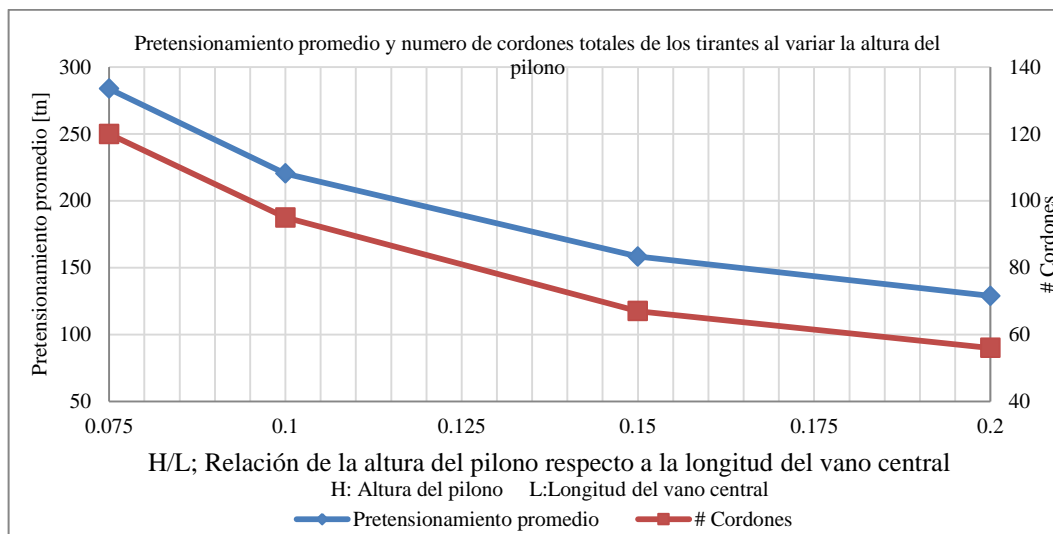


Figura 20. Influencia de la altura de pilono en el pretensionamiento promedio y número de cordones totales de los tirantes.

En la figura 21 se representa la variación de tensión de los tirantes más solicitados, debido a la carga de vía (CV) del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP 200-95) para las distintas alturas de pilono analizadas. De este modo podemos observar que la variación de tensión de los tirantes crece con la altura del pilono. Por ejemplo al pasar de un pilono de 7.5 metros a otro con altura de 20 m se encuentra un aumento de la variación de tensión del tirante más solicitado desde 4,26 kg/mm² hasta 5,24 kg/mm² originada por la carga de vía. Véase tabla 3.

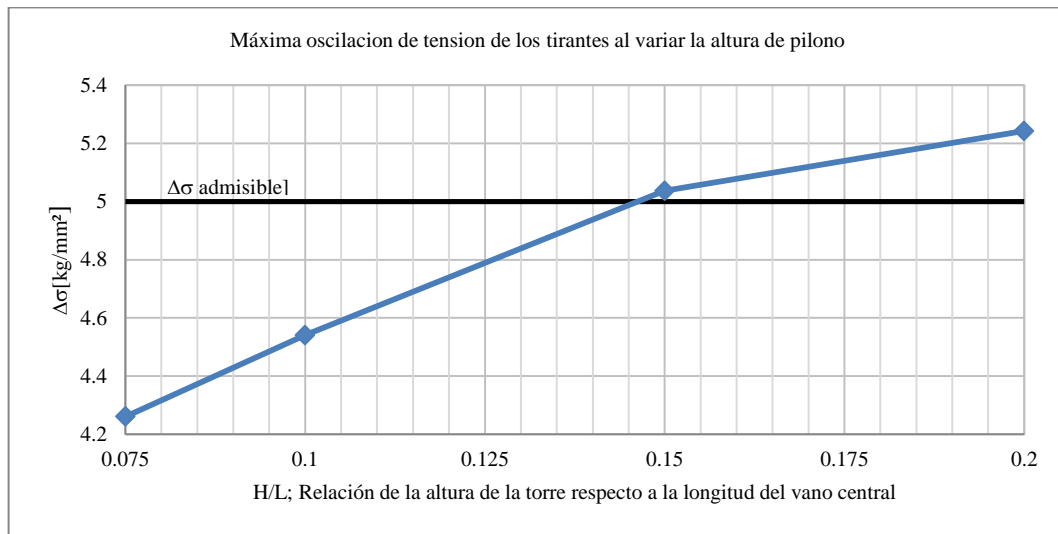


Figura 21. Influencia en la altura del pilono en la máxima oscilación de tensión de los tirantes

H/L	Máxima oscilación de tensión Δσ [kg/mm²]
0,075	4,26
0,1	4,54
0,15	5,04
0,2	5,24

Tabla 3. Máxima oscilaciones de los tirantes al variar la altura del pilono.

Cuando se consideran que los tirantes pasan a través de una silla por la cima de la torre y se utiliza la tecnología de los cables y anclajes utilizada en el pretensado exterior, el límite máximo permisible para evitar fatiga por rozamiento y por tensión es de 5 kg/mm² [Dos Santos, 2006]. Entonces, una altura de torre aproximadamente igual a 0,15 de la longitud del vano central, es la máxima altura admisible para cumplir este requisito, siendo el rango $0,1 < H/L < 0,15$ el que garantiza un mejor comportamiento estructural de los cables, y que es a la vez el rango de mayor uso en los puentes extradosados construidos hasta la fecha, ver figura 22.

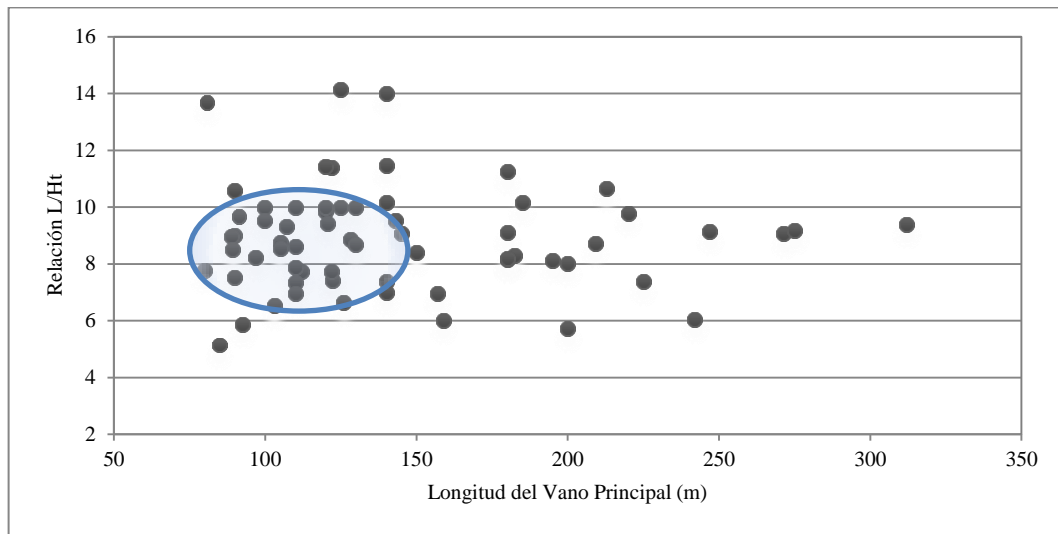


Figura 22. Alturas de pilono implementado en los puentes construidos hasta la fecha.
[Benjumea, en proceso]

4.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL PILONO EN LA DEFORMADA DEL TABLERO.

Por hipótesis de compensación de cargas, para todos los casos estudiados las flechas en el vano central son aproximadamente nulas bajo el estado de cargas permanentes. Los desplazamientos verticales en el tablero por cargas permanentes disminuyen a medida que aumenta la altura del pilono, y se observa que la máxima flecha es de 1,3 cm hacia arriba, para una $H/L=0,075$. Véase figura 23. De la flecha del tablero para el caso de carga CP+CV, ver figura 24, se observó que esta aumenta a medida que aumenta la altura del pilono, en la envolvente máxima, es así que para ($H/L=0,20$) la máxima flecha es de 2,9 cm, que está en el rango admisible por el CCP 200-95.

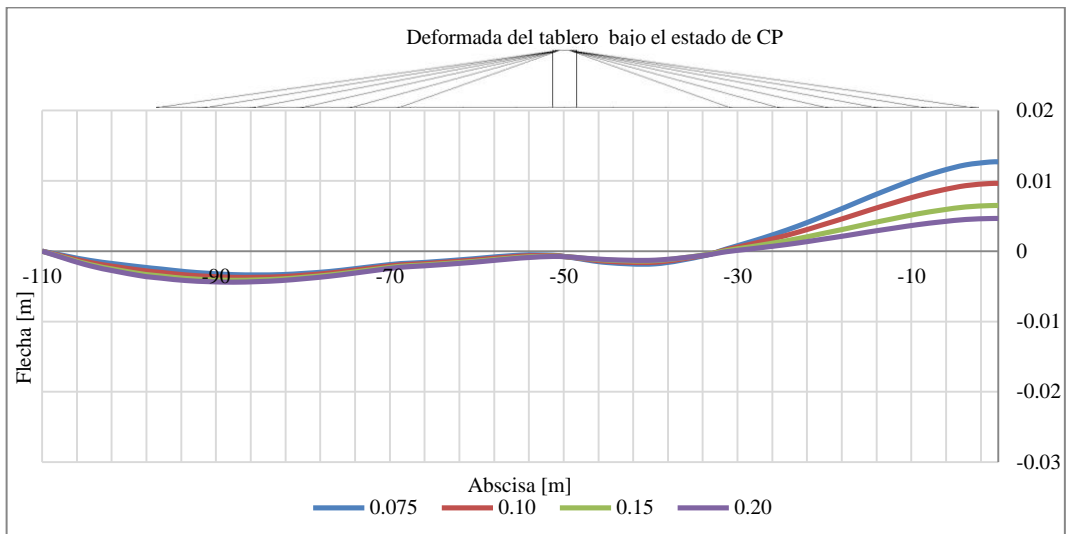


Figura 23. Deformada del tablero bajo cargas permanentes (CP) para diversas alturas de pilono.

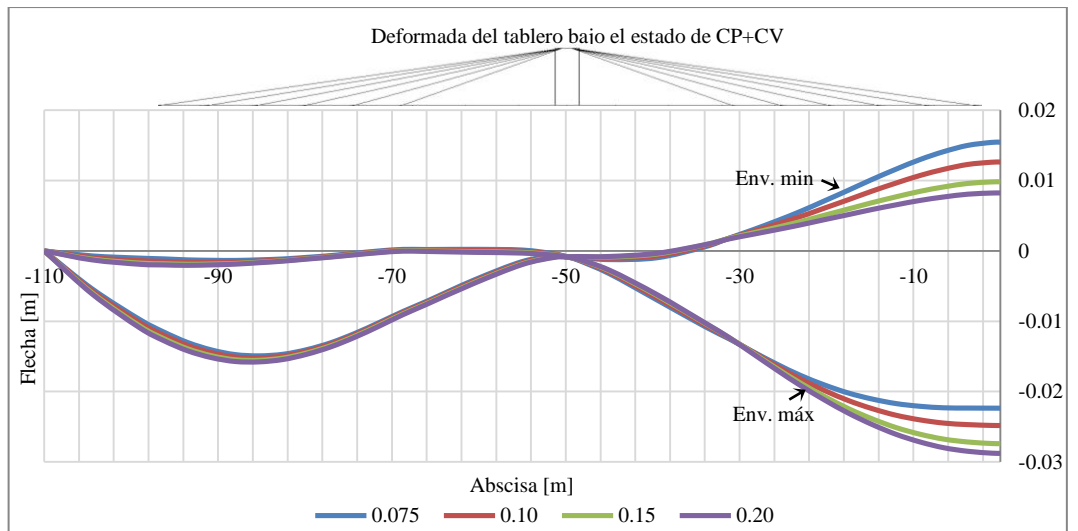


Figura 24. Deformada del tablero por (CP+CV) para diversas alturas de pilono.

En la figura 25 se representa la máxima flecha en el centro de luz del vano central por sobrecarga. De este modo podemos observar que al aumentar la altura del pilono la máxima flecha disminuye en el vano central, siendo este un efecto poco

significativo, debido a que la variación de la máxima flecha entre los casos estudiados es muy baja.

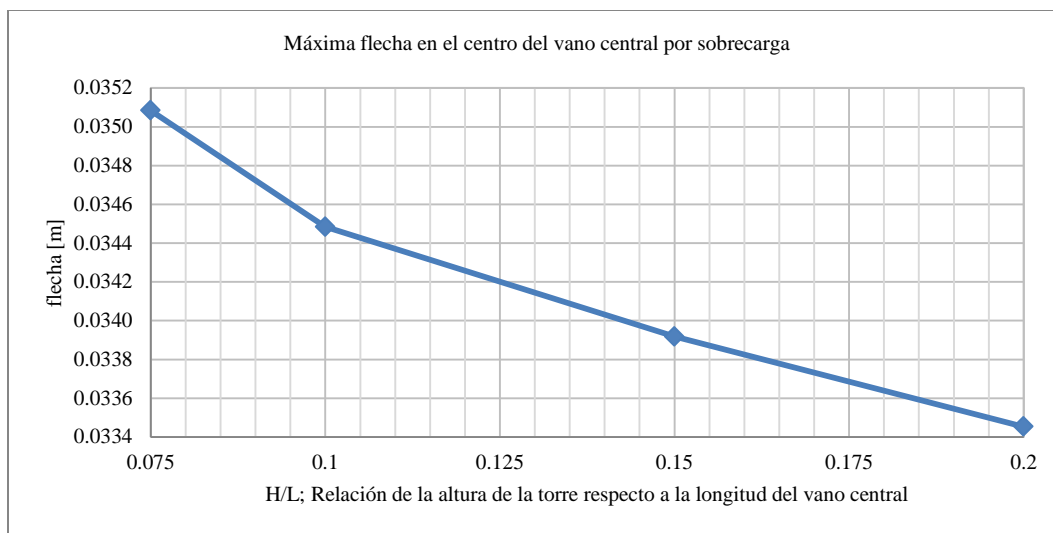


Figura 25. Influencia de la altura del pilono en la máxima flecha en el centro del vano central por sobrecarga.

4.3 INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LA ALTURA DEL PILONO EN LA FUERZAS EN EL TABLERO.

El máximo axial en el tablero crece significativamente al disminuir la altura de la torre. Este máximo axial se presenta en la sección sobre el apoyo de la pila. Debido a que una menor altura de la torre introduce una mayor compresión de los tirantes sobre el tablero, esto en detrimento de su efectividad para contrarrestar las flechas producidas por el peso propio y la carga permanente. Véase figura 26.

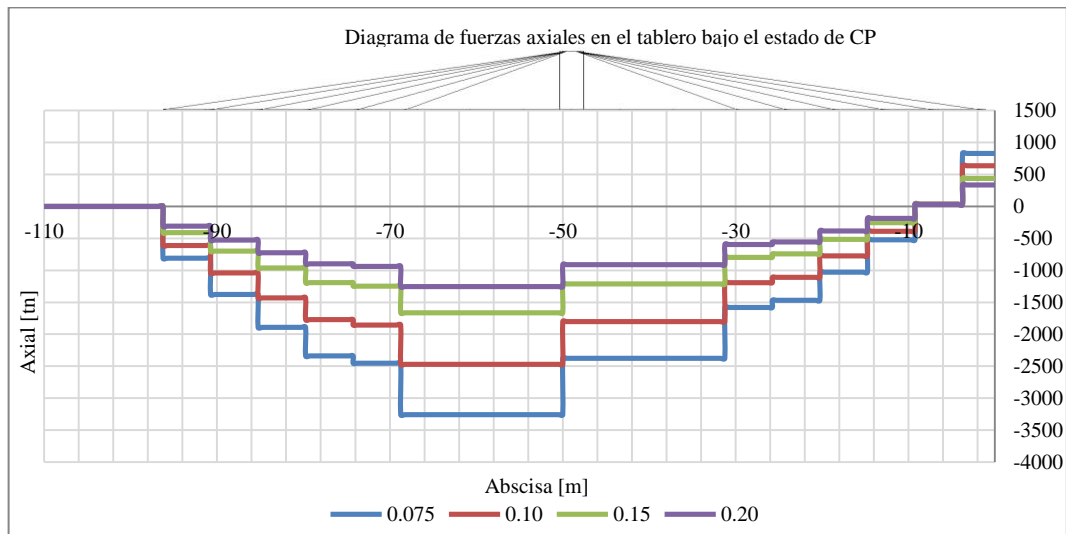


Figura 26. Diagrama de fuerzas axiales bajo el estado de CP para diversas alturas de pilono

Los máximos momentos flectores, en la sección del apoyo de la pila tiene un pequeño decremento en el momento negativo a medida que aumenta la altura del pilono y en la mitad del vano central el momento en la envolvente mínima aumenta mientras que en la envolvente máxima el momento disminuye a medida que aumenta la altura del pilono, véase figura 27 y 28, debido a la eficacia de los cables extradadoses controlada por la altura del pilono.

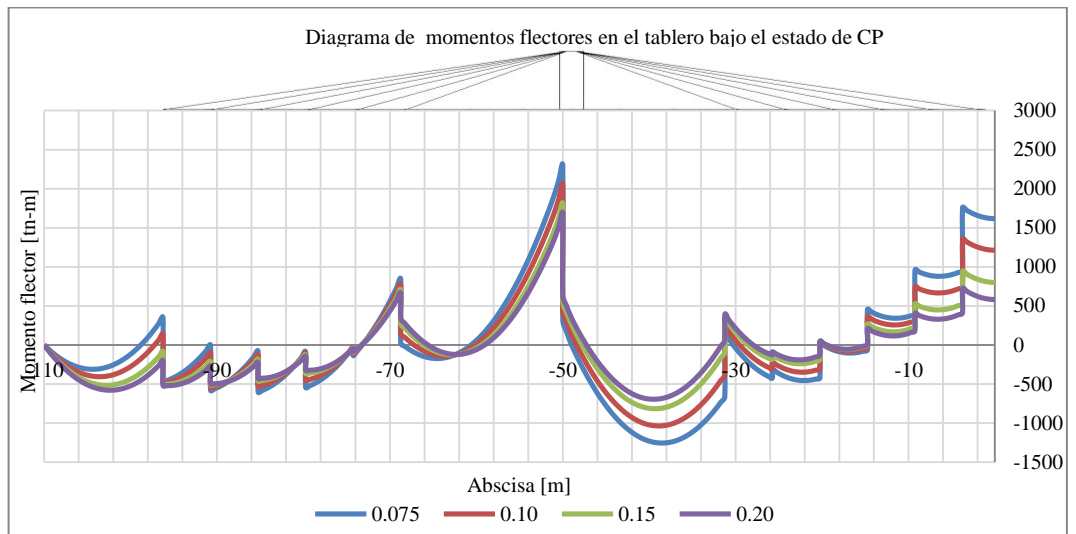


Figura 27. Diagrama de momentos flectores bajo el estado de CP para diversas alturas de pilono.

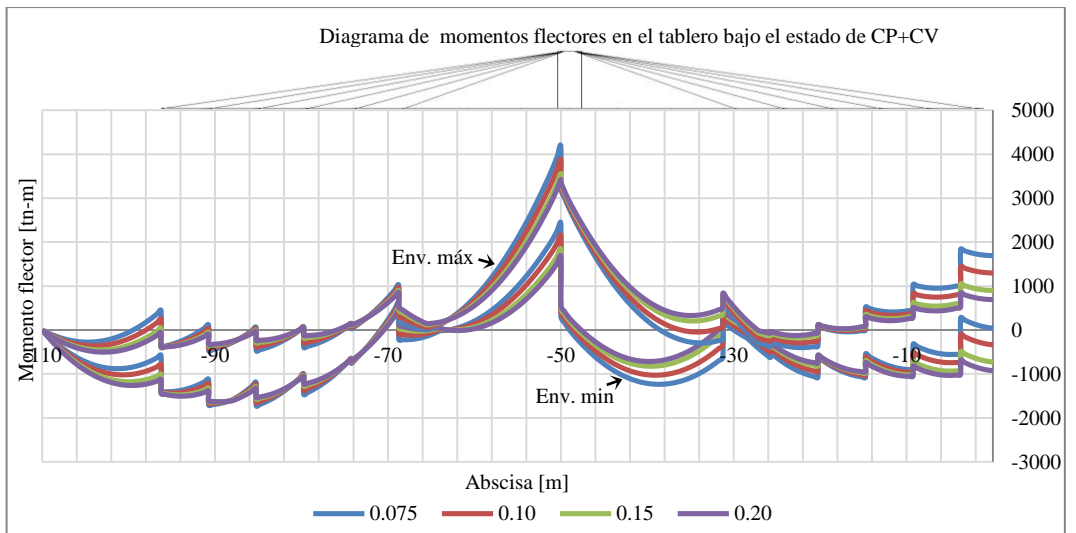


Figura 28. Diagrama de momentos flectores bajo el estado de (CP+CV) para diversas alturas de pilono.

En las figuras 29 y 30 se representan las máximas tensiones en las fibras superior e inferior del tablero bajo el grupo de carga (CP+CV). Se encontró que en la mitad

del vano central las máximas tensiones en la fibra superior e inferior disminuyen con el aumento de la altura del pilono, mientras que en el vano lateral las máximas tensiones en la fibra superior aumentan, mientras que en la fibra inferior estas tensiones disminuyen, ver figura 31, todo esto a medida que aumenta la altura del pilono. Para puentes con relación $H/L=0.075$, la máxima tensión en la fibra superior supera el esfuerzo máximo a tensión de 320 ton/m^2 estipulado en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP 200-95), con un esfuerzo de $321,73 \text{ tn/m}^2$. La máxima tensión en la sección de la pila se aumenta a medida que aumenta la altura del pilono.

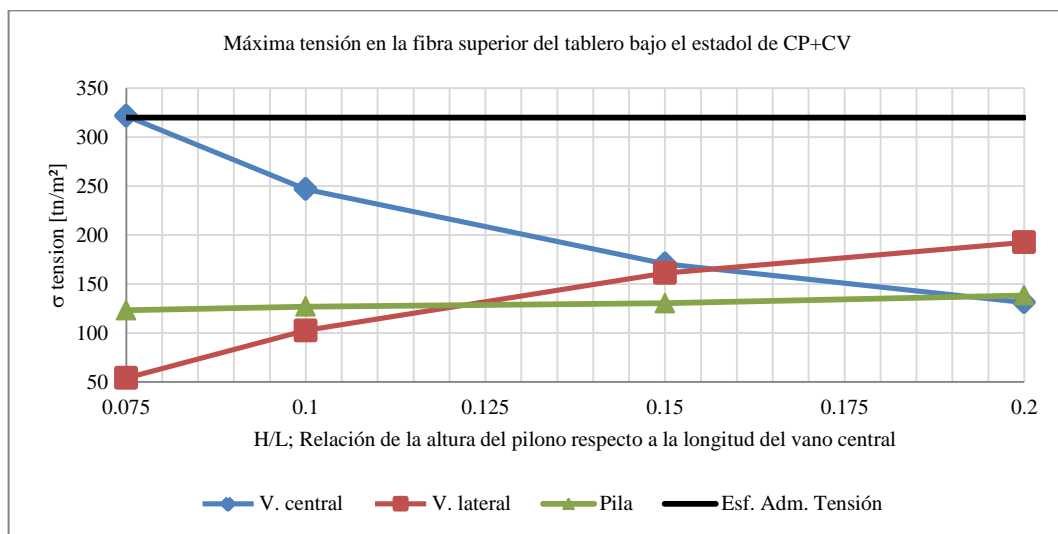


Figura 29. Influencia de la altura del pilono en la máxima tensión en la fibra superior del tablero, en el vano central, vano lateral y sobre el apoyo de la pila.

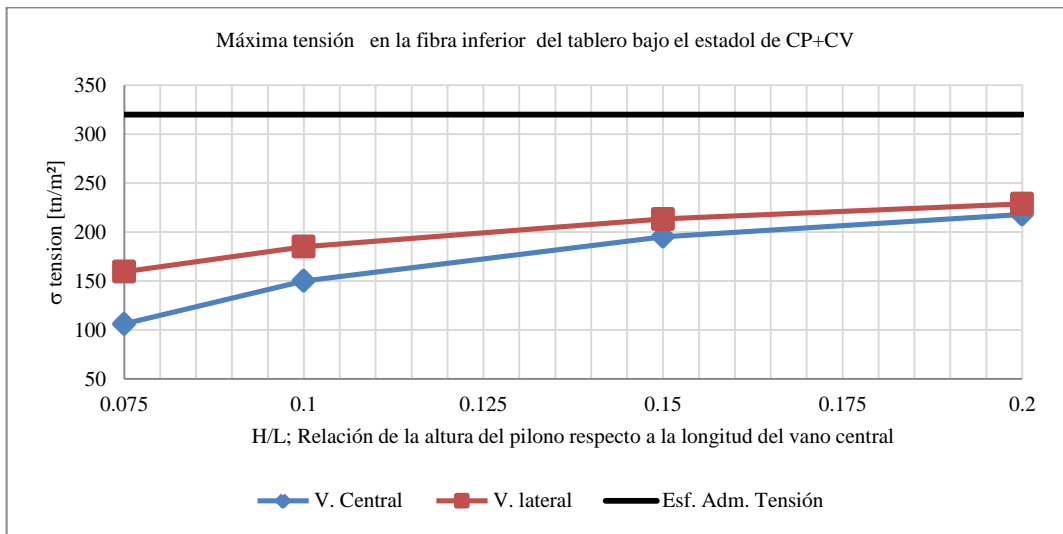


Figura 30. Influencia de la altura del pilono en la máxima tensión en la fibra inferior del tablero, en el vano central y vano lateral.

5. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado se ha centrado en realizar un análisis paramétrico de un puente con pretensado extradadosado de luz central igual a 100 metros, y luz total 220m, bajo cargas permanentes y cargas de tráfico. El análisis numérico se llevó a cabo variando la altura del pilono, siendo estudiadas las relaciones de altura del pilono respecto a la longitud del vano central (H/L), iguales a 0.075, 0.10, 0.15 y 0.20. Las principales conclusiones obtenidas del estudio son:

Del estudio bibliográfico:

- Desde el punto de vista económico, resulta práctico implementar un puente extradadosado, para luces medianas [100m – 200m]. El hecho de permitir descartar el uso de los complejos y costosos anclajes empleados en los puentes atirantados, en los cuales el diseño está totalmente gobernado por el fenómeno de fatiga, mientras en el extradadosado gracias a las pequeñas oscilaciones de tensión no hay problemas de esta índole, se constituye un ahorro sustancial en los costos del proyecto.
- De acuerdo a Dos Santos (2006) es favorable adoptar una variación de tensión máxima en los tirantes de 5 kg/mm² para puentes extradadosados, evitando así los problemas de fatiga. La valoración de este límite debe realizarse a través de más estudios, considerando que en Colombia y Suramérica son muy pocos los puentes extradadosados construidos lo que conlleva a ser conservadores respecto a esta tipología en nuestro medio.

Del análisis paramétrico:

- El aumento en la altura del pilono implica que el número de cordones totales y la fuerza de promedio de presolicitación de los cables disminuye, debido a la menor eficacia de los cables extradados.
- El aumento en la altura del pilono incrementa la máxima oscilación de tensión en los tirantes, debido a que estos son los encargados de soportar la carga viva.
- El aumento en la altura del pilono disminuye las fuerzas axiales en el tablero, debido a que una menor altura del pilono hace que el ángulo formado sea más cerrado, permitiendo de esta manera que las tensiones producidas en los cables actúen más a comprimir el tablero horizontalmente cerca de los apoyos, que a soportar las cargas verticales.
- El aumento de la altura del pilono implica un decremento en la máxima flecha en el centro del vano central por sobrecarga, debido a que los cables extradados ganan eficacia a medida que aumenta la altura del pilono.
- El aumento de la altura del pilono disminuye la magnitud del momento a lo largo del tablero por cargas permanentes, esto debido a la eficacia de los cables extradados controlada por la altura del pilono.
- Se encontró que en la mitad del vano central las máximas tensiones en la fibra superior e inferior disminuyen con el aumento de la altura del pilono, mientras que en el vano lateral las máximas tensiones en la fibra superior aumentan, en la fibra inferior estas tensiones disminuyen, todo esto a medida que aumenta la

altura del pilono. En la sección sobre el apoyo de la pila las máximas tensiones se incrementan a medida que aumenta la altura del pilono.

- El rango de altura óptima para el pilono, que garantice un mejor comportamiento estructural de los cables, y que es a la vez el rango de mayor uso en los puentes extradosados construidos hasta la fecha, es de $0.10 < H/L < 0.15$.

FUTURA LINEA DE INVESTIGACIÓN

- Estudiar el efecto de esbeltez del tablero: Debido a que la variación de tensión en los tirantes y la deformada es más sensible al variar el canto del tablero, además es aconsejable un canto variable en el arranque del voladizo del tablero para un proceso constructivo por voladizos sucesivos.

6. BIBLIOGRAFIA

LIBROS, NORMATIVAS Y ARTICULOS.

AIS. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCP 200-95, Bogotá: AIS.1995.

BENJUMEA, José. (En proceso). Evaluación del comportamiento estructural de puentes extradados con pilares esbeltos en zonas de alta sismicidad. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga.

BENJUMEA, José; CHIO, Gustavo; MALDONADO, Esperanza. Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes extradados: visión general y estado del arte. Revista Ingeniería de construcción. 2010.

CHIO CHO, Gustavo. Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes con pretensado extradado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2000.

CHIO CHO, Gustavo; BENGOCHEA, Aparicio. El puente con pretensado extradado. Un nuevo tipo estructural. UIS Ingenierías. Vol. 1, No 1. 2002.

ISHII, Marcio. Sistemas estruturais de pontesextradorso. Tesis de Maestría. Universidad de São Pablo. São Pablo, 2006.

LOPEZ Elkin. VANEGAS Sergio. Sistemas constructivos en puentes con pretensado extradado, estado del arte. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009.

MERMINGAS, Konstantinos. Behaviour and Design of Extradosed Bridges. MSc Thesis. University of Toronto. Toronto 2008.

MIRANDA DOS SANTOS, Daniel. Comportamento Estrutural de Pontes com Protesão no Extradorso. Tesis de Maestría. Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. São Paulo. 2006.

ROJAS Erwin. ZUÑIGA Luis. Modelado estructural del puente de hormigón con pretensado extradorado mediante técnicas experimentales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009.

PAGINAS WEB

VSL Post-Tensioning & Specialty Reinforcement Systems. VSL MULTISTRAND SYSTEMS: Strand and Tendon Properties. Copyright 2010.

<http://www.vsl.net/Portals/0/vsl_datasheets/VSL_Data_Sheets_Multistrand.pdf>