

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A TORSION EN PUENTE ATIRANTADOS

**ANDRES FELIPE SANDOVAL OJEDA
DANIEL ALFONSO TRUJILLO FORERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECCANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A TORSIONEN PUENTE ATIRANTADOS

**ANDRES FELIPE SANDOVAL OJEDA
DANIEL ALFONSO TRUJILLO FORERO**

Trabajo de Grado en la modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniero Civil

DIRECTOR

ALVARO VIVIESCAS JAIMES

Ingeniero Civil, Ph.D. – Profesor UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Principalmente dedico este proyecto a mi querida madre Luz Helena Ojeda Caro, por ser una madre ejemplo y que por suerte mía, es la mujer que me crió. Todo su amor, esfuerzo y dedicación, se lo debo y espero recompensarlo muy pronto. Ha sido y seguirá siendo vital apoyo para lograr cada uno de los logros que he cumplido en mi vida. Sin ella no hubiese sido posible este logro.

A mi padre Humberto Sandoval Perdomo por brindarme valores que solo un padre como él, puede brindar. Soy un reflejo de mi padre.

De las mejores cualidades que tengo, se las debo a él. Gracias por los consejos que han hecho de mí, una buena persona.

A mis abuelos Alirio Ojeda y María del Carmen Caro de Ojeda, que son mis segundos padres. Son las personas que estuvieron junto a mí en el transcurso de mis estudios universitarios. Les agradezco por el amor y la comprensión que he recibido de ustedes.

A mi familia y amigos porque de cada uno de ellos aprendí a ser mejor persona y a desarrollar habilidades que no conocía. Compartimos experiencias que perpetuaran en mi vida.

Andrés Felipe.

DEDICATORIA

En primer lugar dedico este logro a Dios, por guiarme y darme sabiduría a lo largo de este camino.

A mis padres Luis Alfonso Trujillo Cárdenas y María Antonia Forero Ortiz, por permitirme crecer en un hogar lleno de amor, donde siempre me inculcaron la ganas de triunfar y de nunca descansar hasta llegar a la meta. Además de su constante apoyo incondicional durante toda mi etapa de estudio.

A mi hermana María José, que fue una de mis grandes motivaciones para nunca descansar en la búsqueda de mi sueño.

A mi novia, por estar conmigo apoyándome, entendiéndome y animándome, que sin importar la situación siempre tuvo palabras de amor, de felicitaciones para que siguiera adelante y no me frustrase ante cualquier dificultad.

A mi tío Juan Carlos Trujillo, quien fue mi mentor y guía para saber qué carrera elegir.

Gracias

A mi abuela Ana Mercedes, mi segunda madre, por su cariño y amor.

A mi abuelo Alfonso que ya no está conmigo, que tuve el privilegio de conocerlo y que sus recuerdos están muy presentes, sé que desde donde se encuentre estará muy orgulloso.

A mis demás familiares que me acompañaron a lo largo mi carrera y de mi vida.

Por ultimo a todos mis compañeros y amigos por hacer de esta una experiencia inolvidable, en donde quedaran grabados los momentos de gloria.

Daniel Alfonso

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A nuestras familias por el apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto

Al Ingeniero Civil Ph.D. – Director del proyecto Álvaro Viviescas Jaimes, por su orientación y paciencia en el desarrollo del proyecto de investigación.

Al Ingeniero M.Sc. Mostafa Sotoodeh, P.E., el cual brindó un modelo simplificado del puente atirantado para de este modo tener una respuesta en cuanto a diagramas de contantes y momentos que se requería en este tipo de puentes.

Al ingeniero Civil M.Sc. Raul Amaya, por brindar documentación base para el proyecto y también por su orientación en cuanto a modelamiento avanzado de puentes atirantados en programas desarrollados para análisis estructural.

CONTENIDO

INTRODUCCION	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
2.0 DESARROLLO.....	21
2.1 Planteamiento del problema	21
2.2 Comportamiento y condiciones de servicio de los puentes atirantados	24
2.3 Propiedades empleadas en el modelo	25
2.4 Metodología empleada para el modelamiento	26
3.0 PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	34
3.1 Descripción de Criterios Normativos.....	34
3.1.1 AASTHO LRFD Bridge Design Specifications 5th.	34
3.1.2 Eurocode 2, Desing of concreto structures.....	37
3.2 Resultados análisis por software a nivel longitudinal y seccional	39
4.0 CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	48
ANEXOS.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales propiedades mecánicas del puente.	26
Tabla 2. Áreas e inercias de las secciones transversales bicelular y tricelular.	26
Tabla 3. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en eje central y sección transversal bicelular.	40
Tabla 4. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en los ejes laterales y sección transversal bicelular.	40
Tabla 5. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en eje central y sección transversal tricelular.	41
Tabla 6. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en los ejes laterales y sección transversal tricelular.	41
Tabla 7. Desplazamiento en el punto más crítico de la sección tricelular, donde se genera la mayor concentración de torsión, variando la ubicación de los tirantes.	44
Tabla 8. Desplazamiento en el punto más crítico de la sección bicelular, donde se genera la mayor concentración de torsión, variando la ubicación de los tirantes.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal tricelular del puente empleada en el modelo.	22
Figure 2. Sección transversal bicelular del puente empleada en el modelo.	22
Figura 3. Modelo de sección transversal bicelular con distribución de los tirantes centralmente.	22
Figura 4. Modelo de sección transversal bicelular con distribución de los tirantes lateralmente.	23
Figura 5. Modelo de sección transversal tricelular con distribución de los tirantes centralmente.	23
Figura 6. Modelo de sección transversal tricelular con distribución de los tirantes lateralmente.	24
Figura 7. Configuración del puente atirantado con pilón central en forma de A.	24
Figura 8. Alineamiento y tablero del puente atirantado con una longitud de 1180 metros.	27
Figura 9. Pilón principal puente atirantado “La Pepa” en forma de diamante invertido con sección hueca.	29
Figura 10. Modelo en 3D del puente con un atirantamiento lateral.	31
Figura 11. Modelo en 3D del puente con un atirantamiento central.	31
Figura 12. Alzado del modelo del puente atirantado en CSIBrigde v. 15.	32
Figura 13. Detalle de los nodos de continuidad para las secciones transversales bicelular.	33

Figura 14. Detalle de los nodos de continuidad para las secciones transversales tritelular.	33
Figura 15. Acciones, combinaciones internas dentro de las diferentes paredes de una sección caja.	37
Figura 16. Sección transversal Bicelular-Central Deformada.	45
Figura 17. Sección transversal Tritelular-Central Deformada.	45
Figura 18. Sección transversal Bicelular-Lateral Deformada.	46
Figura 19. Sección transversal Tritelular-Lateral Deformada.	46

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Relación resultados del comportamiento torsional en la sección para el modelo Central-bicelular y Lateral-bicelular.	42
Grafica 2. Relación resultados del comportamiento torsional en la sección para el modelo Central-tricelular y Lateral-tricelular.	42
Grafica 3. Relación resultados del comportamiento torsional en la sección para el modelo Central-tricelular y Central-bicelular.	43
Grafica 4. Relación resultados del comportamiento torsional en la sección para el modelo Lateral-bicelular y Lateral-tricelular.	43

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Modelo realizado por el Ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh, P.E. Master of Science in Structures para carga muerta (D) con semejante dimensionamiento longitudinal, localización de apoyos y presenta un atirantamiento sobre el eje central del tablero a modo corroboración de los modelo hechos en CSIBrigde V. 15. **50**
- Anexo B. Resultados de los diagramas de momentos para carga muerta (D) del modelo realizado por ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh. **50**
- Anexo C. Resultados de los diagramas de cortante para carga muerta (D) del modelo realizado por ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh. **51**

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A TORSION EN PUENTES ATIRANTADOS.¹

AUTORES: ANDRES FELIPE SANDOVAL OJEDA ²
DANIEL ALFONSO TRUJILLO FORERO.³

PALABRAS CLAVE: Puente Atirantado, Comportamiento Torsional, Tirantes, Secciones Bicelular, Sección Tricelular, Carga Viva, Carga Muerta, EUROCODE y AASHTO.

DESCRIPCIÓN:

Los puentes atirantados se clasifican entre una de las estructuras que requieren un alto grado de precisión y entre tantos análisis que se deben realizar, se encuentra el diseño a torsión. Se toma como referencia el proyecto “Puente la Pepa”, puente que atraviesa la bahía de Cádiz, España, que en la actualidad está bajo construcción.

El objetivo del proyecto propuesto se orientó a analizar el comportamiento a torsión de una manera comparativa y simplificada en la superestructura. Se crean modelos y se analizan en un programa de análisis estructural, los cuales, emplean dos tipos de secciones transversales (bicelular y tricelular, cada una en un modelo diferente) y además, variando la distribución de los tirantes (sosteniendo el tablero de su eje central y de sus ejes laterales, en modelos diferentes), para de esta manera poder concluir, en términos de magnitud de torsión y a modo de razón, cuál de los modelos generados posee un mejor comportamiento ante este efecto en la superestructura, hallando las zonas de mayor influencia a la torsión. Adicionalmente, haciendo uso de las normas EUROCODIGO [1] y AASHTO [2], se hace una descripción de los criterios que emplea cada norma para su respectiva evaluación de la torsión en puentes.

¹ Proyecto de grado. Modalidad Proyecto de Investigación.

^{2,3} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Álvaro Viviescas Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: **STUDY OF THE TORSION BEHAVIOR IN CABLE STAYED-BRIDGES.⁴**

AUTHOR: ANDRES FELIPE SANDOVAL OJEDA ⁵
DANIEL ALFONSO TRUJILLO FORERO.⁶

KEYWORDS: Cable-Stayed bridges, torsion behavior, straps, concrete box with one girder, concrete box with tow girders, live load, dead load, EUROCODE and AASHTO.

DESCRIPTION:

Cable-Stayed bridges are between one of the structures that require a high level of precision and among many analysis that must be performed, is the design of torsion. It draws on the project "La Pepa Bridge", bridge across the bay of Cadiz, Spain, which is currently under construction. The objective of the proposed project is aimed to analyze a comparative and simplified way of the torsion behavior in the superstructure.

Models are created and analyzed on a structural analysis program, which employ two types of cross-sections (concrete box with one girder and concrete box with tow girders, each in a different pattern) and also, by varying the distribution of the straps (board holding its central axis and its lateral axis, each in a different pattern), to thus be able to conclude, in terms of magnitude of torsion and a way of reason, which of the generated models has a better performance to this effect in the superstructure, finding the areas of greatest influence to torsion. Additionally, using EUROCODE and AASHTO standards, a description is made according to the criteria used by each respective standard for its evaluation of torsional design.

⁴ Undergraduate Thesis Project. Investigation Mode.

^{5,6} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Álvaro Viviecas Jaimes.

INTRODUCCION

Debido al crecimiento constante y veloz de las poblaciones que conlleva al progreso y expansión de las grandes y pequeñas ciudades, se ha visto obligado el hombre a crear estructuras que estén acordes a este fenómeno natural.

Como base principal de este desarrollo se encuentra la movilidad vial. En sectores urbanos ubicados en zonas de topografías onduladas y montañosas, la necesidad de crear redes viales más eficaces es de vital importancia por lo que surgió y evolucionó la estructura conocida como puente. Esta estructura se ha desarrollado a través del tiempo logrando mayores distancias y optimizando su comportamiento frente a cargas a las que pudiese ser sometido.

En la actualidad, el estudio de estructuras ha evolucionado y se ha especializado hasta tal punto que es posible encontrar pluralidad de puentes que se diferencian entre sí y se clasifican según su diseño estructural, la tipología en puentes actualmente existente es: Puentes losa, puentes viga-losa, puentes viga-cajón, puentes extradados, puentes colgantes, puentes arco y puentes atirantados [3].

El objeto de estudio del presente proyecto recae específicamente sobre el puente atirantado, el cual puede entenderse como una estructura con cimientos, bases, losa o tablero y que se particulariza por emplear tirantes que se anclan de su tablero a su mástil. Se distingue de los puentes colgantes porque en estos los cables principales se disponen de pila a pila, sosteniendo el tablero mediante cables secundarios verticales, y porque los puentes colgantes trabajan principalmente a tracción, mientras que los atirantados tienen partes a tracción y otras a compresión.

Estos puentes se han desarrollado debido a la necesidad de conectar extremos de distancias considerables y, debido a los avances en este tipo de puentes, actualmente se logran longitudes entre vanos de hasta mil ciento cuatro metros, logrando así la construcción del Puente de la isla Russki ubicado en Vladivostok,

considerado hoy en día como el puente atirantado con el vano más largo del mundo. De igual forma el desarrollo del diseño estructural ha permitido que en países como Colombia se encuentre el Puente Gilberto Echeverri Mejía, ubicado en Medellín, que en el sistema de los atirantados es uno de los que cuenta con los tableros más anchos del mundo. Este es el puente interurbano más grande del país. Tiene 580 metros de longitud y 40,5 metros de ancho.

Para lograr tales atributos en los puentes, es claro que el diseño de estas estructuras debe ser meticulosamente analizado y desarrollado. Entre los diferentes análisis de puentes atirantados se encuentra el comportamiento a torsión, el cual depende del diseño de la estructura en donde la distribución de las cargas variará para algunos elementos y esto hace que su comportamiento difiera para cada variante de la mencionada estructura.

El comportamiento torsional es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento. En puentes, esta torsión se genera o es soportada en el eje de la superestructura a partir de cargas que se aplican en zonas que no estén contenidas en el eje longitudinal de la superestructura, lo que resulta en un momento resistido en este eje.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento a torsión en puentes atirantados en función del tipo de sección transversal (Viga cajón bicelular y tricelular) y de la distribución de los tirantes (eje central y laterales), para un puente tipo y realizar un estudio comparativo a nivel normativo (Normas internacionales).

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un estudio comparativo de los criterios existentes a nivel normativo para evaluar la torsión en puentes atirantados utilizando las normas AASHTO y EUROCODIGOS.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño a torsión en función de dos tipos de sección transversal (Viga cajón bicelular y tricelular) y variando además la distribución de los tirantes (Eje central y laterales), para un puente tipo establecido (Se definirá luz central, tipo de atirantamiento, ancho de la sección y tipo de torre).

2. DESARROLLO

2.1 Planteamiento del problema

Como objetivo base del proyecto se pretendió desarrollar una serie de modelos propuestos que en el caso actual, se pretendía modelar el puente que atraviesa la Bahía de Cádiz, localmente conocido como “El Puente La Pepa”.

Este proyecto actualmente en construcción fue diseñado con el propósito de conectar el municipio de puerto real España con la ciudad de Cádiz. El Puente “La Pepa” tendrá una longitud total de 3157 metros, poseerá un vano central de 540 metros, soportado por tirantes dirigidos desde dos torres configuradas como diamante invertido (a cada extremo de este vano), hacia cada borde del tablero. Su tablero comprenderá de varias secciones transversales, las cuales varían desde secciones aligeradas en concreto reforzado a rigidizadores metálicos.

Detallando un poco más el diseño de “El Puente La Pepa”, este posee: seis apoyos; dos de estos están ubicados a cada extremo de la estructura y los siguientes dos están ubicados a 120 metros de cada uno de los apoyos que están en los extremos. Los cuatro apoyos anteriormente mencionados transfieren la carga a la cimentación por medio de pilas que constituyen la misma sección transversal, la cual está configurada por dos tramos de diferente sección. Un primer tramo comienza desde su cimiento hasta 3 metros por debajo de la losa inferior de la sección transversal del tablero y los 3 metros restantes van hasta la unión con el tablero.

Por último, los dos apoyos restantes fueron configurados para resistir la mayor carga proveniente de la luz central de 540 metros; este pilón consiste de una pila hueca que recibe el diamante invertido y la torre. Esta configuración es semejante en los dos pilones.

En cuanto al estudio del comportamiento torsional en puentes atirantados, se propusieron dos secciones transversales: sección bicelular y sección tricelular, con

las cuales se generaron dos modelos por cada sección con el fin de, a modo de razón, evidenciar qué tanta es la influencia que genera al utilizar una determinada sección en un diseño.

A continuación, representación gráfica en 3D de las secciones propuestas: las secciones transversales del puente se pueden observar en las **Figuras 1 y 2**.

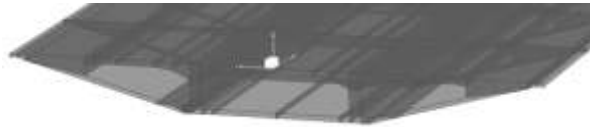


Figura 1. Sección Transversal Tricelular del puente empleada en el modelo. Fuente: Autores



Figura 2. Sección Transversal Bicelular del puente empleada en el modelo.

Fuente: Autores

Sintetizando, los modelos desarrollados fueron:

1.

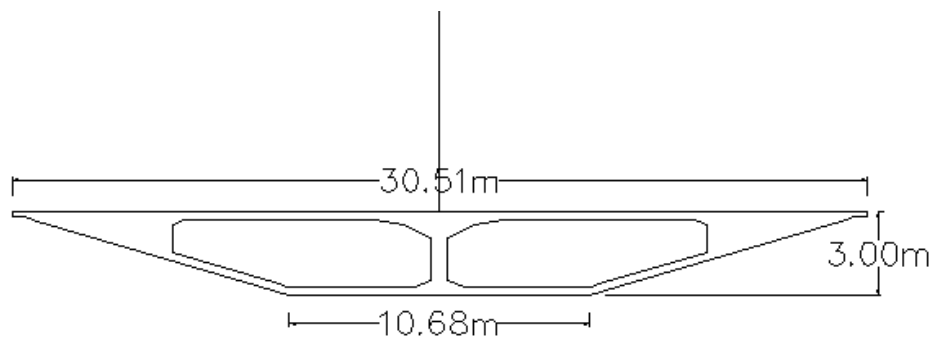


Figura 3. Modelo de sección transversal bicelular con distribución de los tirantes centralmente. Fuente: Autores

2.

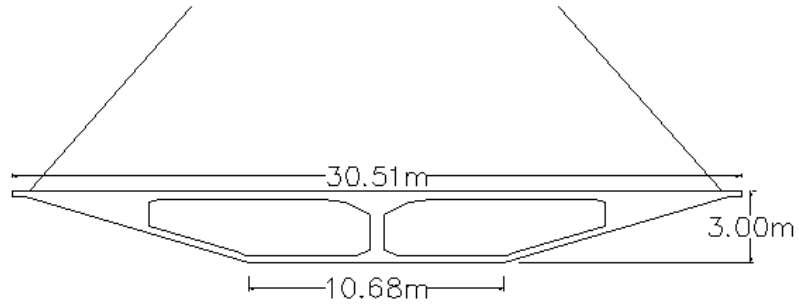


Figura 4. Modelo de sección transversal bicelular con distribución de los tirantes lateralmente. Fuente: Autores

3.

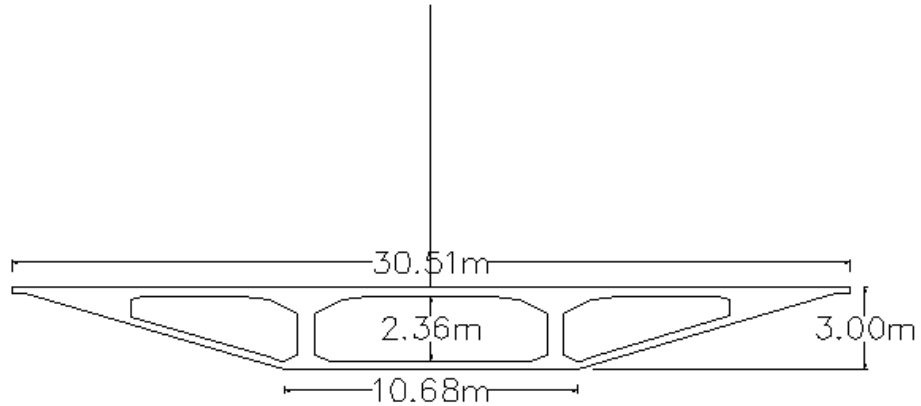


Figura 5. Modelo de sección transversal tricelular con distribución de los tirantes centralmente. Fuente: Autores

4.

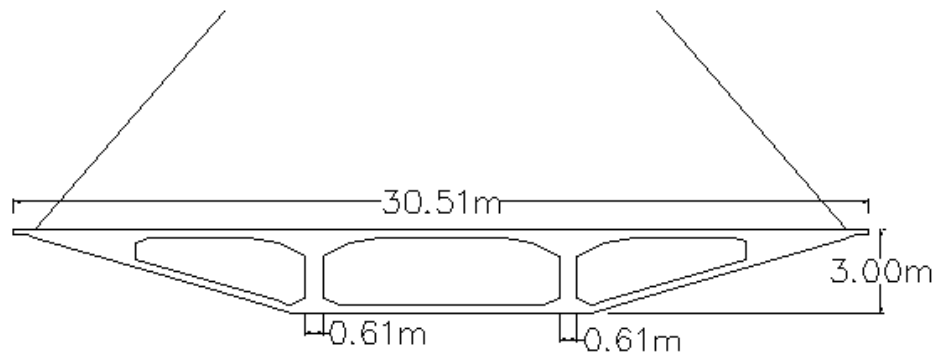


Figura 6. Modelo de sección transversal tritelar con distribución de los tirantes lateralmente. Fuente: Autores.

2.2 Comportamiento y condiciones de servicio de los puentes atirantados

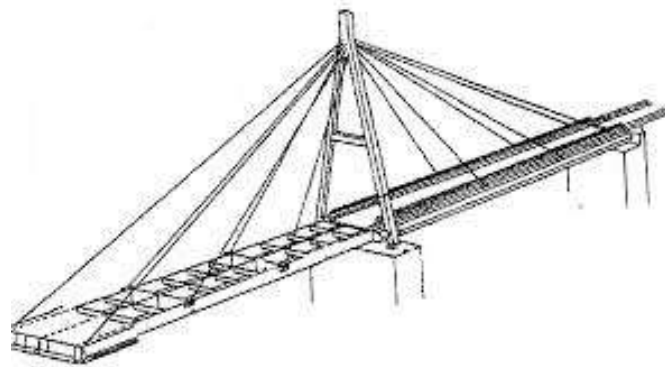


Figura 7. Configuración de puente atirantado con pilar central en forma de A.

En puentes atirantados, las cargas generadas se transfieren de la siguiente manera: Después de ser aplicada la carga en la superestructura, ésta se transmite a su apoyo más cercano a través de la sección del tablero. El siguiente elemento a

recibir esta carga serán los tirantes, los cuales se tensionan permitiendo la transferencia a través de sí mismos. Obtenida la carga por la torre, ésta viaja a través del pilón, dependiendo de su configuración, para de esta manera llevarla a los cimientos.

La particularidad de presentar compresiones y tracciones en las diferentes zonas de la superestructura, es debido a la componente longitudinal de los tirantes actuando al mismo tiempo. Para zonas donde se encuentra el pilón y cercanas a este, se trabaja a compresión debido al encuentro de esfuerzos axiales provenientes de los tirantes a lado y lado del pilón. Por otro lado, para zonas como el centro de la luz, donde se encuentran tirantes dirigidos a direcciones opuestas, los esfuerzos tienden a traccionar esta zona, ya que los esfuerzos van en sentidos contrarios.

2.3 Propiedades empleadas en el modelo

Para el desarrollo de este proyecto de investigación fue suministrada, por parte de la oficina CARLOS FERNANDEZ CASADO, S.L. de Madrid, España, información acerca del puente atirantado “La Pepa”; dentro de dicha información encontramos archivos tales como: planos y presentaciones, cuyo contenido se establecen especificaciones respecto a los materiales utilizados (propiedades mecánicas y físicas).

En la **tabla 1** se observan las propiedades utilizadas para el análisis.

Tabla 1. Principales Propiedades Mecánicas del Puente.

Propiedades Mecánicas	
Densidad del concreto	2500 Kg/m ³
Densidad del acero	7850 Kg/m ³
Modulo de elasticidad del acero	210000 MPa
Modulo de elasticidad del concreto	24000 Mpa
Relacion de poisson del concreto	0,2
Relacion de poisson del acero	0,3
Resistencia del concreto	8500 Psi

En la **tabla 2** se presenta el área y las inercias para cada una de las secciones empleadas en el modelo.

	Area [m²]	Inercia I33 [m⁴]	Inercia I22 [m⁴]
Seccion Tricelular	25.0679	26.4557	1642.9298
Seccion Bicelular	25.1525	25.245	1804.769

2.4 Metodología empleada para el modelamiento

CSIBridge v.15, programa desarrollado para el análisis de puentes, fue elegido para desarrollar el análisis estructural de los puentes atirantados. Se escogió debido a que una parte del proyecto se enfoca en variar la sección transversal, enfoque anteriormente mencionado. Esta herramienta tienen una función que facilita la variación de parámetros que se le definen al puente, entre estas está la de crear innumerables secciones transversales del tablero y fácilmente cambiarla entre una y otra, facilitando así, la realización de estudios paramétricos.



Se inició definiendo una pendiente que se aproxima a lo diseñado para el puente “La Pepa”; según las coordenadas de la ubicación de los tirantes en el tablero, se calculó una pendiente tanto de subida como de bajada del 4.34%.

Definida la pendiente, se creó el alineamiento del puente el cual comprende 1180 metros horizontales y en la mitad de su longitud logra una elevación de 25.606 metros, tomando como origen el comienzo del puente, generando así, su perfil longitudinal. **Ver figura 8.**

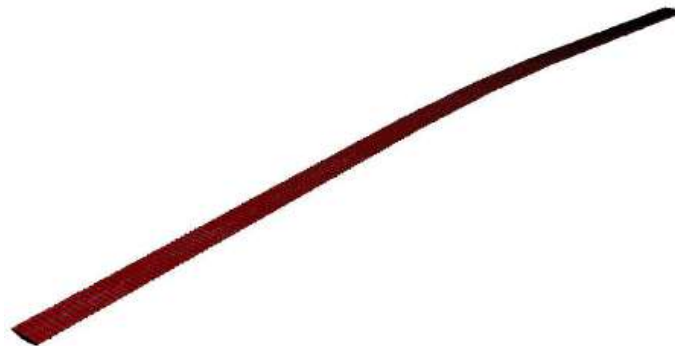


Figura 8. Alineamiento y tablero del puente atirantado con una longitud de 1180 metros.

Con el alineamiento creado, se procede a definir el tipo de sección que será asignada al puente. Para el caso del proyecto, se dimensionaron dos secciones las cuales se analizan por aparte. Las dos coinciden en formar un tablero continuo de concreto con un ancho de 30.5 metros y un canto máximo de 3 metros. Este dimensionamiento fue utilizado en los rigidizadores empleados en el diseño real

del puente que atraviesa la Bahía de Cádiz; las secciones difieren en el tipo de aligeramiento que presentan. Las secciones transversales a analizar son: Sección Bicelular y Sección Tricelular. **Ver Figuras 1 y 2.**

Creadas las secciones, se continúa con la definición de las luces de la estructura. El puente presenta 5 luces: primera de 120 metros, segunda de 200 metros, tercera que a la vez es la central con 540 metros, cuarta de 200 metros y quinta de 120 metros. Claramente se está planteando una estructura simétrica desde el centro de su superestructura y se procede a generar el tablero en tercera dimensión con una discretización de 5 metros a lo largo del tablero, en donde el programa crea puntos según lo discretizado.

Diversos estudios demuestran que los puentes atirantados trabajan a tracción y a compresión.

Este efecto es generado por los elementos que particularizan este tipo de puentes, los tirantes.

Partiendo de los puntos generados por el programa, puntos que serán utilizados para unir los elementos que componen la estructura, se crean las pilas como elementos tipo "Frame", haciendo coincidir la losa inferior de la superestructura con el punto superior de la pilas.

Los pilones principales están caracterizados por tener forma de diamante invertido, apoyada por una pila a tierra, con un longitud aproximada de 45 metros, donde se desprenden dos elemento diagonales con un ángulo respecto a la horizontal de 36° y una longitud de 26 metros. Estos elementos se unen por medio de una viga donde se apoya el tablero, con una longitud de 42 metros. De manera continua dos elementos diagonales llegan a una altura de 30 metros con respecto a la viga de apoyo del tablero, formando así, el diamante invertido. Desde este punto inicia la torre, un elemento vertical de una longitud de 56 metros donde llegan los tirantes. El primer tirante está ubicado a un metro del punto superior del diamante invertido; los demás tirantes se ubican a

una distancia de 2 metros respecto al anterior, para un total de 22 uniones, donde los tirantes se anclan en la torre. El tipo de elemento empleado para el modelamiento de todos los elementos que comprenden cada pilón se modelaron como tipo "Frame". **Ver Figura 9.**

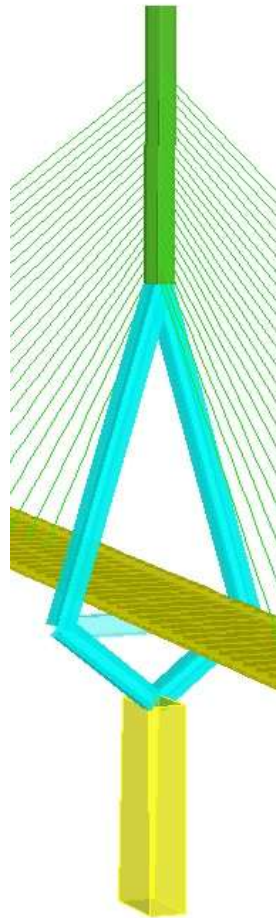


Figura 9. Pilón principal puente atirantado "La Pepa" en forma de diamante invertido con sección hueca. Fuente: Programa CSIBridge v.15

Los tirantes difieren de los otros elementos en que estos trabajan únicamente a tensión. Son elementos estructurales donde su función es transmitir las cargas a través de sí mismos desde uno de los extremos que lo componen hasta el otro.

En el atirantamiento presente, estos elementos transfieren las cargas generadas por su área aferente en la unión con el tablero hasta su lugar de apoyo. En este caso, las cargas se transmiten a las torres.

Respecto al modelamiento de los tirantes, a manera de investigación, debido a una serie de complicaciones obtenidas en los resultados que arrojaba el programa después de ser analizada la estructura, se planteó la idea de crear dos modelos adicionales en los cuales se creaba uno con tirantes como elementos tipo “Cable” y otro con tipo “Link Support”, con el fin de corroborar resultados.

La herramienta CSIBridge v.15, está diseñada para modelar elementos tipo “Cable” donde se considera la catenaria. En cuanto a los elementos tipo “Link Support”, se debía realizar un cálculo de la rigidez que aporta cada tirante. Después de analizados los resultados, al verificar el verdadero comportamiento que requería esta estructura, se optó por utilizar elementos tipo “Cable” para el modelamiento final.

Definido cual fuese el tipo de elemento que modelara dicho modelo, se procedía a unir tirante por tirante iniciando desde el tablero hasta su respectiva localización en la torre. La ubicación de los tirantes es uno de los propósitos del proyecto, teniendo como objetivo variar la distribución de los tirantes donde se generan modelos con atirantamiento en el eje central y por otro lado, modelos con atirantamiento a 14.5 metros a lado y lado, es decir, paralelamente de su eje central. **Ver Figuras10, 11 y 12.**

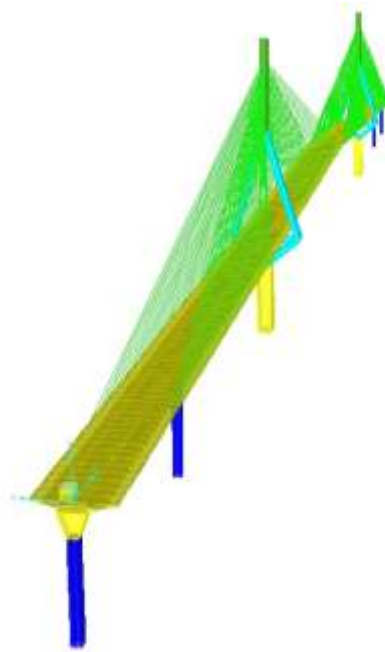


Figura 10. Modelo en 3D del puente con un atirantamiento lateral. Fuente: Programa CSIBridge v.15

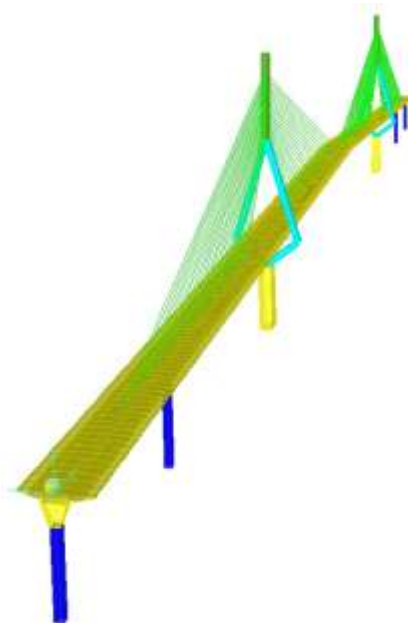


Figura 11. Modelo en 3D del puente con un atirantamiento central. Fuente: Programa CSIBridge v.15

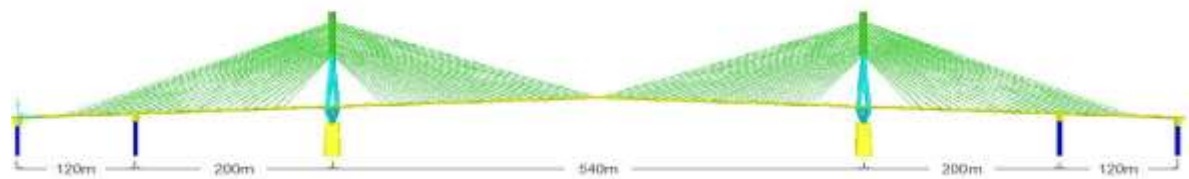


Figura 12. Alzado del modelo del puente atirantado en CSIBridge v.15. Fuente: Programa CSIBridge v.15 .

El distanciamiento longitudinal entre tirante y tirante fue diseñado con un valor de 10 metros empezando a 55 metros a lado y lado de cada torre. El número de tirantes presentes por cada torre para el modelo que sostiene el tablero desde el eje central, es de 44 y para el modelo que sostiene el tablero desde sus extremos, el número de tirantes es de 88. Para este caso, sabiendo que al ser el doble de elementos presentes que el anterior modelo descrito, se propuso emplear la mitad del área transversal de los tirantes, con el fin de asemejar la magnitud de los resultados.

El puente “La Pepa”, como ya se había mencionado, posee una longitud total de 3157 metros de los cuales se modeló la parte central que constituye el atirantamiento, pero es claro, que los elementos adyacentes que complementan la estructura en su totalidad aportan una rigidez al modelo. Por lo anterior, se realizó un cálculo de la rigidez aportada por las pilas en el extremo que conecta con Cádiz. Esta rigidez se le asignó a los puntos generados con una serie de elementos denominados “Springs” (Resortes), a los puntos de la sección transversal en el extremo donde se está generando la continuidad, **ver Figuras 13 y 14.**

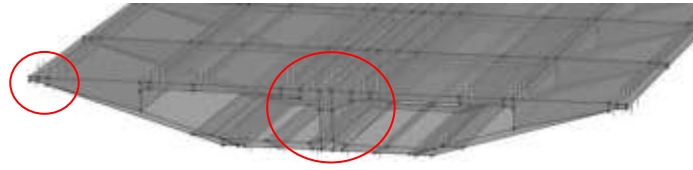


Figura 13. Detalle de los nodos de continuidad para las secciones transversales bicelular. Fuente: Programa CSIBridge v.15.

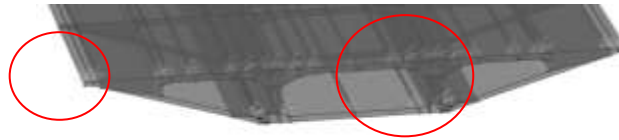


Figura 14. Detalle de los nodos de continuidad para las secciones transversales tricelular. Fuente: Programa CSIBridge v.15

Por diseño, el otro extremo está trabajando como una unión libre en el sentido longitudinal, es decir, no se genera aporte de rigidez por parte de las pilas adyacentes de ese extremo.

Generado el modelo en 3D y con el fin de analizar el comportamiento torsional de la estructura, se pusieron a consideración el tipo de cargas a las que, según el enfoque del proyecto, serían apropiadas para comparar los diferentes modelos generados.

Todos los modelos fueron igualmente cargados: magnitud, dirección y localización. Las cargas evaluadas fueron: la carga muerta de la estructura y una carga puntual de 1500 kN (similar magnitud obtenida de un estudio torsional en puentes atirantados llamado “ Analysis of torsión stiffness and eccentric-loading effect for cable-stayed bridge with large width-to-span ratio”, realizado por Nottingham University Press), ubicada estratégicamente de manera tal que generara la respuesta más crítica en la que se pudiese ver el modelo.

Conocido previamente el concepto de torsión, se ubicaron las cargas en la mitad de la luz central a su extremo derecho sobre el eje del carril externo, es decir, excéntricamente a 11 metros del eje central del puente.

3. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Descripción de Criterios Normativos

Los criterios normativos en cuanto al comportamiento a torsión se citarán de una manera descriptiva.

3.1.1. AASTHO LRFD Bridge Design Specifications 5th.

Requisitos Generales

5.8.2.1 General

La resistencia a la torsión mayorada, T_r , se tomará según la ecuación **(1)**:

$$T_r = \phi T_n \quad (1)$$

Dónde:

T_n = Resistencia nominal de torsión (N · mm), Artículo 5.8.3.6

ϕ = Factor de Resistencia, Artículo 5.5.4.2

Para el concreto de peso normal, los efectos de torsión deberán ser investigados según la ecuación **(2)**:

$$T_u > 0.25 \phi T_{cr} \quad (2)$$

En la que T_{cr} , momento torsional de fractura se estima con la siguiente ecuación **(3)**.

$$T_{cr} = 0.125\sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_c} \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{0.125\sqrt{f_c}}} \quad (3)$$

Donde

T_u = Momento de torsión mayorado (N · mm)

T_{cr} = Momento torsional fractura (N · mm)

A_{cp} = área total encerrada por el perímetro exterior de sección transversal de hormigón (mm²)

P_c = la longitud del perímetro exterior de la sección de hormigón (cm)

f_{pc} = fuerza de compresión en el hormigón después de pretensado las pérdidas han ocurrido en el centroide de la sección transversal resistiendo las cargas transitorias o por la unión del alma y el ala donde el centroide se encuentra en la brida (ksi)

Para las estructuras celulares, se presenta la siguiente desigualdad **(4)**:

$$\frac{A_{cp}^2}{P_c} < 2 A_o b v \quad (4)$$

Donde,

A_o= Área encerrada por la trayectoria de flujo de cortante, incluyendo cualquier área de agujeros en ellos (mm²)

Si el momento de torsión mayorado es menor de $\frac{1}{4}$ del momento de torsión pura de fractura, esto causara solo una muy pequeña reducción del cortante o capacidad de flexión y por lo tanto se puede despreciar

Resistencia-torsión

La resistencia a la torsión nominal se deberá tomar como, lo expresa la ecuación (5):

$$T_n = \frac{2 A_o A_t F_y \cot \theta}{s} \quad (5)$$

Dónde:

A_o = área encerrada por la trayectoria del flujo de cortante, incluyendo las zonas de agujeros allí (mm²).

A_t = área de una etapa de refuerzo de torsión transversal cerrada en los miembros de sólidos, o el área total de refuerzo de torsión transversal en el alma exterior de los miembros celulares (mm²).

θ = ángulo de la grieta

La norma AASTHO LRFD Bridge Design Specifications 5th, basa sus especificaciones y análisis en las áreas (flujo de cortante y etapa de refuerzo) de las secciones transversales del puente teniendo en cuenta sus aligeramientos (número de células), convirtiéndose en un ítem muy importante para conocer qué tan resistente es a los efectos producidos por la torsión, la ecuación (5) nos permite concluir que el área y las propiedades de la sección son proporcionales a su resistencia a la torsión.

3.1.2. Eurocode 2, Desing of concreto structures

Procedimiento de diseño

Los efectos de la torsión y cortante tanto para los miembros huecos y sólidos pueden superponerse, asumiendo el mismo valor para la inclinación puntal ϕ .

Para secciones de caja, cada pared debe ser verificada por separado, para la combinación de fuerzas de cizallamiento derivadas forma cortante y torsión. **Ver figura 15.**

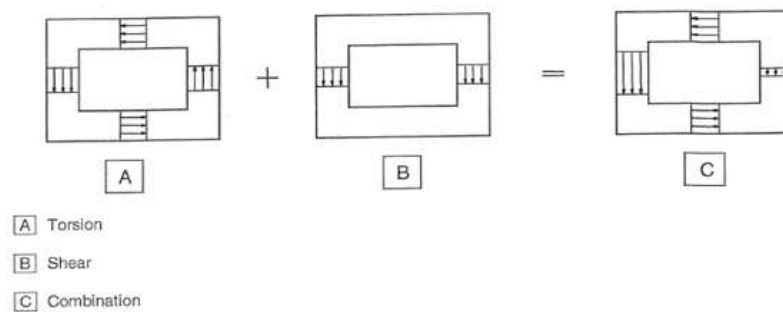


Figura 15. Acciones, combinaciones internas dentro de las diferentes paredes de una sección caja.

El área requerida de la armadura longitudinal de torsión $\sum A_{sl}$ puede calcularse a partir de expresión (6)

$$\frac{\sum A_{sl} f_{yd}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2 A_K} \cot\theta \quad (6)$$

Donde

u_k = Perímetro del área A_K

f_{yd} = Diseño de tensión de fluencia del refuerzo longitudinal A_{sl}

θ = Es el ángulo de puntales de compresión

De acuerdo a la compresión, la armadura longitudinal puede ser reducida en proporción a la fuerza mecánica de compresión disponible.

En cuerdas de tracción longitudinal de tensión debe añadirse al otro refuerzo. La armadura longitudinal generalmente debe ser distribuida sobre la longitud de lado, pero para secciones más pequeñas que se puede concentrar en los extremos de esta longitud.

La resistencia máxima de un miembro sometido a torsión y cortante está limitada por la capacidad de los puntales de hormigón. Con el propósito de no superar esta resistencia la siguiente condición debe ser satisfecha.

Para secciones transversales sólidas

$$\frac{T_{ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1.0$$

Dónde:

T_{ed} es el momento de torsión del diseño

V_{ed} es la fuerza transversal de diseño

$T_{Rd,max}$ = Es el diseño momento resistencia a la torsión de acuerdo con

$$T_{Rd,max} = 2 v \alpha_{cw} \alpha f_{cd} A_K t_{fw,i} \sin\theta \cos\theta$$

$V_{Rd,max}$ = Es la máxima resistencia a cortante de diseño, en las secciones transversales sólidas toda la anchura de la banda puede ser para determinar

$$V_{Rd,max}$$

Para secciones cajón, cada pared debe ser diseñada por separado para los efectos combinados de esfuerzo cortante y torsión. El estado límite último para concreto debe comprobarse con referencia a la resistencia al cortante de diseño

3.2 Resultados del análisis por el software a nivel longitudinal y seccional.

Una vez finalizado el montaje del puente en la herramienta CSIBridge v.15, se corre el modelo analizando los resultados a nivel longitudinal (diagramas de momento, cortante y torsión).

Los diagramas de torsión a nivel longitudinal, nos permitieron conocer, de una forma comparativa, como es el comportamiento a torsión de un puente atirantado según la ubicación de los tirantes, si el atirantamiento es presentado en el eje central o en los ejes laterales del tablero.

De igual forma, se da a conocer, con datos numéricos, el comportamiento a torsión del tablero del puente atirantado para las dos tipos de secciones transversales. Se toman como referencia varios puntos a nivel longitudinal, buscando la zona que presenta la respuesta más crítica, para establecer cómo afecta su respuesta a la torsión sí se varía la sección transversal.

A continuación en las **tablas 3, 4, 5 y 6**, se presentan los resultados de los valores de la torsión a nivel seccional, realizado con el programa CSIBridge v.15.

Tabla 3. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en eje central y sección transversal bicelular.

Central Bicelular	
Ubicación	T [KN-m]
Entire Brigde Section	11085.4098
Left Exterior Girder	-2051.2436
Interior Girden 1	594.5725
Right Exterior Girder	3435.6297

Tabla 4. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en los ejes laterales y sección transversal bicelular.

Lateral Bicelular	
Ubicación	T [KN-m]
Entire Brigde Section	11145.0805
Left Exterior Girder	-1843.7937
Interior Girden 1	600.5325
Right Exterior Girder	3231.0532

Tabla 5. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en eje central y sección transversal tricelular.

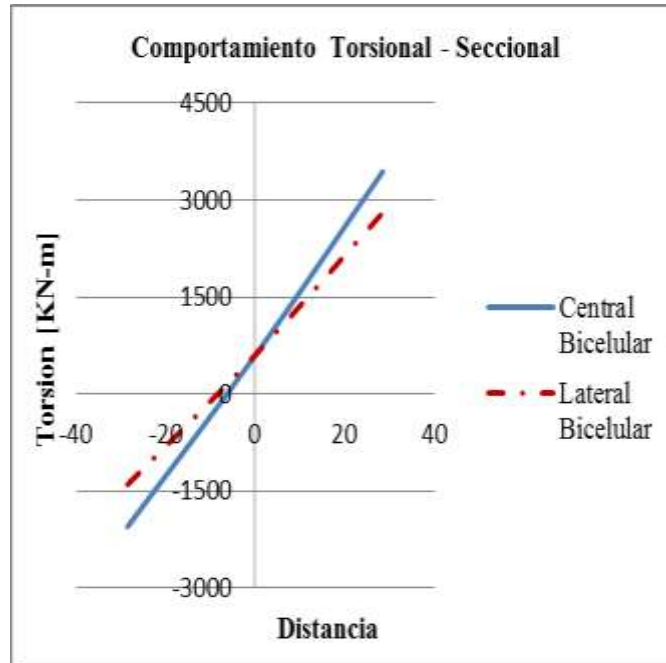
Central Tricelular	
Ubicación	T [KN-m]
Entire Brigde Section	11026.2766
Left Exterior Girder	-1090.8132
Interior Girden 1	-274.7928
Interior Girden 2	1299.1744
Right Exterior Girder	2127.3706

Tabla 6. Resultados a nivel seccional del comportamiento torsional en el tablero a 590 metros de su origen, para el modelo puente atirantado con tirantes en los ejes laterales y sección transversal tricelular.

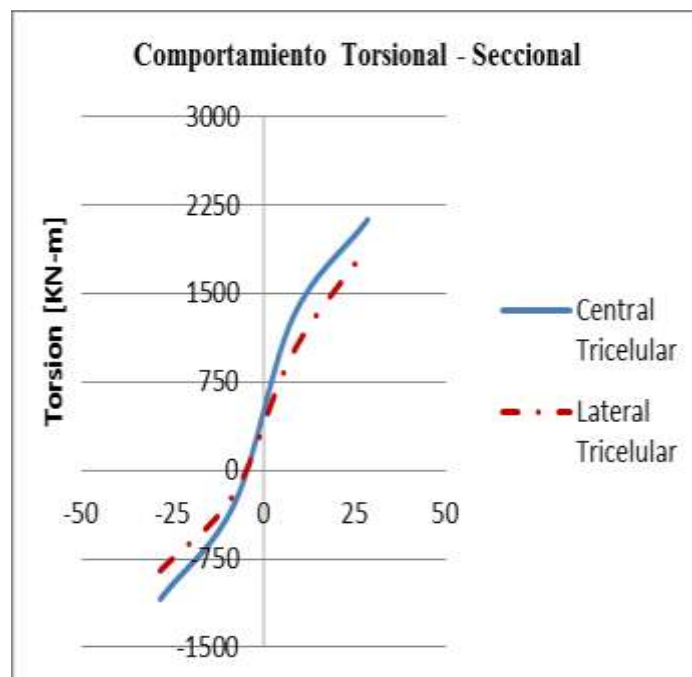
Lateral Tricelular	
Ubicación	T [KN-m]
Entire Brigde Section	11103.647
Left Exterior Girder	-983.983
Interior Girder 1	-212.718
Interior Girder 2	1252.775
Right Exterior Girder	2030.224

A continuación las **gráficas 1, 2, 3 y 4** donde se aprecia la relación entre los modelos generados y los resultados arrojados por el programa a 590 metros longitudinales desde su origen.

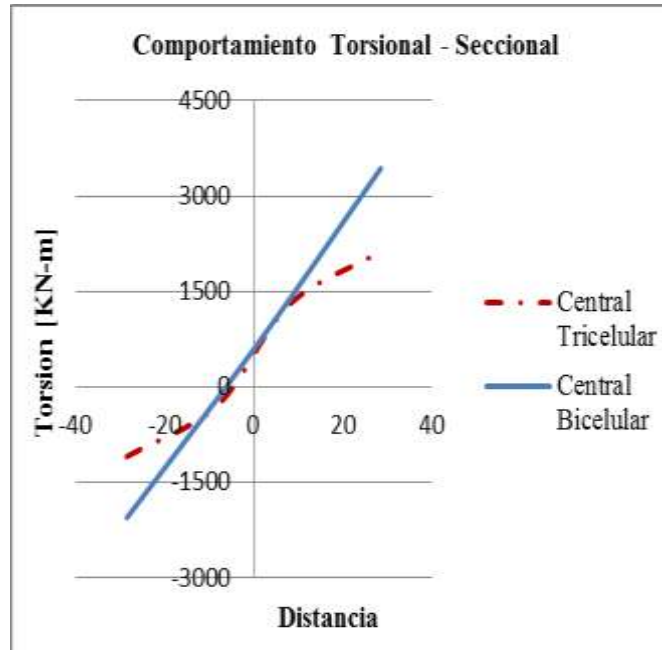
Grafica 1. Relación de resultados del comportamiento torsional del tablero en la sección para el modelo Central-bicelular y Lateral-bicelular. Fuente: Autores



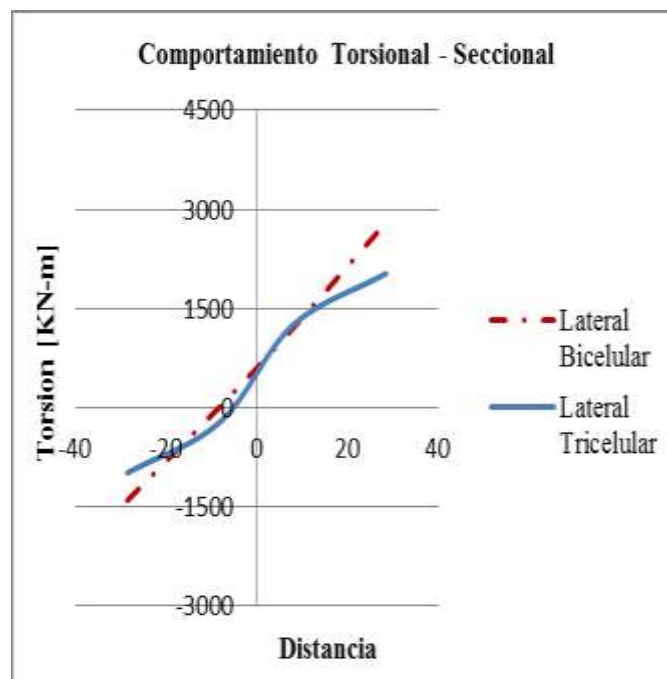
Grafica 2. Relación de resultados del comportamiento torsional del tablero en la sección para el modelo Central-tricelular y Lateral-tricelular. Fuente: Autores



Grafica 3. Relación de resultados del comportamiento torsional del tablero en la sección para el modelo Central-tricelular y Central-bicelular. Fuente: Autores



Grafica 4. Relación de resultados del comportamiento torsional del tablero en la sección para el modelo Lateral-bicelular y Lateral-tricelular. Fuente: Autores



Teniendo en cuenta que los desplazamientos generados por los efectos de la torsión, es uno de los parámetros que nos permite hacer un análisis de las influencia de la ubicación de los tirantes y de la sección que se está utilizando, se extraen del programa como información complementaria y se hace un análisis de su respuesta en el punto más crítico, donde se evaluaron los valores de la torsión a nivel de la sección transversal. **Ver Tablas 7 y 8.**

	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]
Central Bicelular	-20.88	-16.4861	-63.0233
Lateral Bicelular	-15.879	-5.0073	-40.7902
Relacion	131.49	329.24	154.51

Tabla 7. Desplazamiento en el punto más crítico de la sección tritelular, donde se genera la mayor concentración de torsión, variando la ubicación de los tirantes.
Fuente: Autores

	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]
Central Bicelular	-20.88	-16.4861	-63.0233
Lateral Bicelular	-15.879	-5.0073	-40.7902
Relación	131.49	329.24	154.51

Tabla 8. Desplazamiento en el punto más crítico de la sección bicelular, donde se genera la mayor concentración de torsión, variando la ubicación de los tirantes.
Fuente: Autores

A continuación los modelos de las secciones deformadas para cada una de las situaciones anteriormente propuestas.

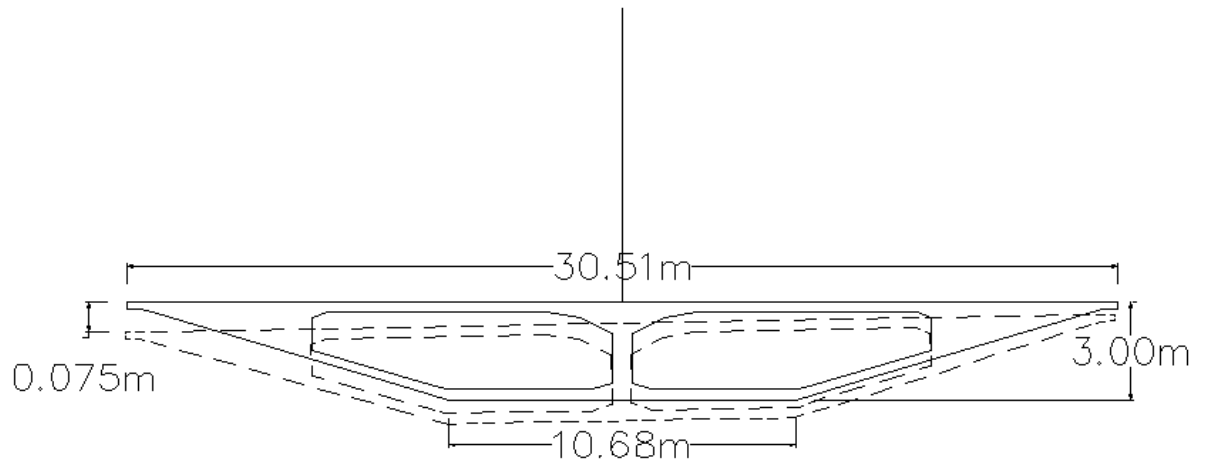


Figura 16. Sección transversal Bicelular-Central Deformada. Fuente: Autores

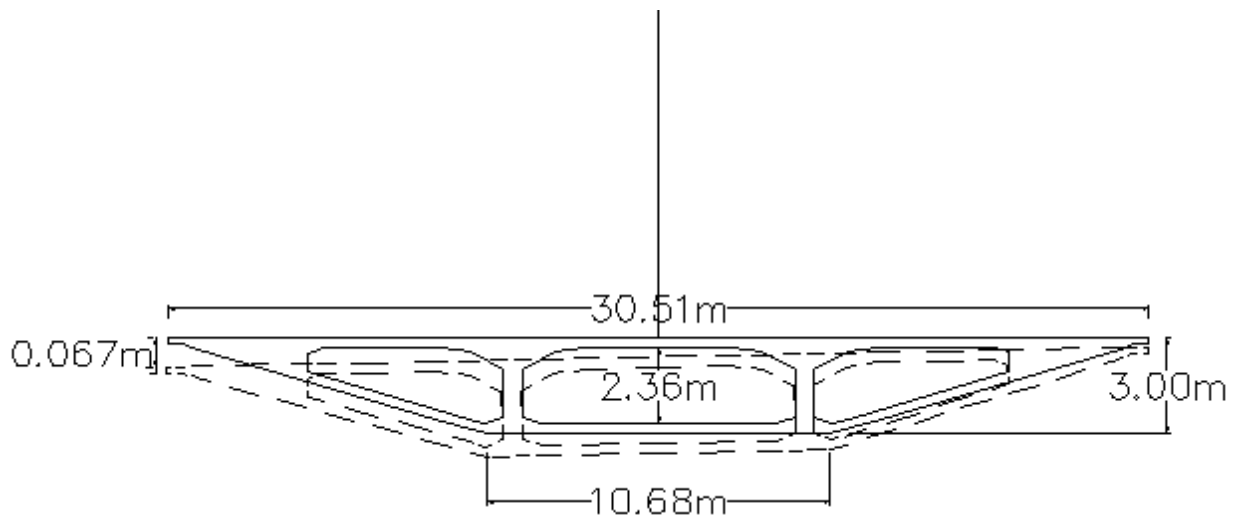


Figura 17. Sección transversal Tricelular-Central Deformada. Fuente: Autores

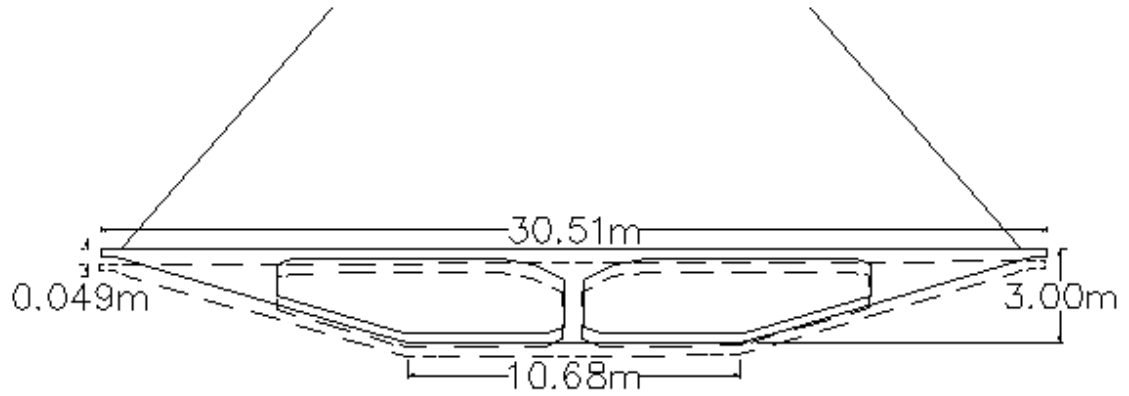


Figura 18. Sección transversal Bicelular-Lateral Deformada. Fuente: Autores

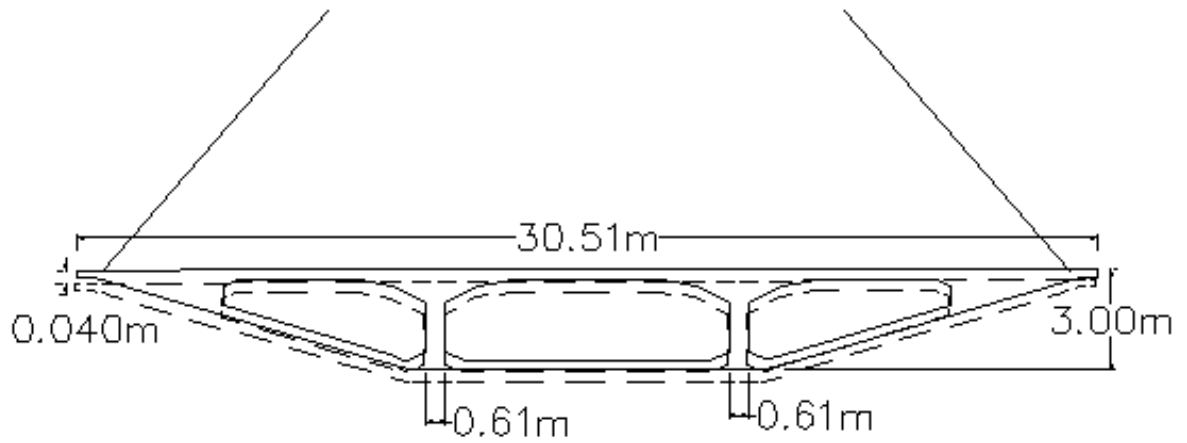


Figura 19. Sección transversal Tricelular-Lateral Deformada. Fuente: Autores

4. CONCLUSIONES

Longitudinalmente analizando, en el modelo sometido a una carga excéntrica se puede apreciar que la distribución de los tirantes soportando el tablero juega un papel muy importante para el comportamiento a torsión. En el análisis presente con atirantamiento lateral, que se puede interpretar como dos soportes en la ubicación de estos tirantes, parte de la carga excéntrica es absorbida por los tirantes, lo que conlleva a un menor esfuerzo a torsión por parte de la superestructura. Por otro lado, en modelos con atirantamiento sobre el eje central, que se interpreta como un apoyo en el centro y voladizos a lado y lado, se obtiene la totalidad de la magnitud de la torsión generada en la superestructura, creando un diseño mayor para controlar este efecto.

A nivel seccional, se obtuvieron respuestas donde la sección tricelular se comporta mejor que la sección bicelular; esto es debido al momento de inercia que genera cada sección (para poder concluir en términos de inercia, fue necesario crear las secciones de casi igual área transversal, área de concreto sin incluir los aligeramientos).

Datos numéricos arrojados por el análisis del programa, mostrados en las tablas 2, 3, 4 y 5, permitieron graficar los puntos y, sabiendo su ubicación en cada sección, se puede concluir que la sección transversal al presentar más elementos divisorios, como lo son los “Girders” (Vigas I), se comporta de forma cada vez más conveniente para el diseño a torsión.

Dibujadas las secciones transversales con su respectiva deformación, lo que facilitó la apreciación de lo que estaba ocurriendo a nivel seccional del puente, se puede concluir que las deformaciones presentes en cada modelo son realmente considerables cuando se genera una variación en la distribución de los tirantes. Con los modelos analizados se observa que para el caso del atirantamiento lateral

se presenta una deformación sin manifestar tanta rotación, es decir, todos los puntos se desplazan distancias parecidas, sin perjuicio de una leve rotación latente. Para la deformación de los modelos con atirantamiento central, esta rotación es más notoria, presentando mayor desplazamiento en sectores donde está aplicada la carga y pocos desplazamientos en sectores del extremo opuesto al punto de aplicación de la carga.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Eurocode 2, Desing of concreto structures, Part 2: Concrete bridges- design and detailing rules.

[2] AASHTO LRFD Brigde Design Specifications, Fifth edition 2010, American Association of State Highway and Transportation Officials.

[3] Montero S, Ingeniería de Puentes, Única Edición, Universidad Pontificia Bolivariana, 2010 Bucaramanga, 10/375, p375.

[4] Quintanilla, María F, “Métodos constructivos de puentes atirantados – Estudio de la distribución de los tirantes”, Memoria de trab+ajos de difusión científica y técnica, No 7,2009, pp. 13 -28.

[5] Anexo: Puentes atirantados más largos del mundo, http://es.wikipedia.org/wiki/anexa:puentes_atirantados_m%c3%AIs_largos_del_mundo, [citado 7 de septiembre de 2013]

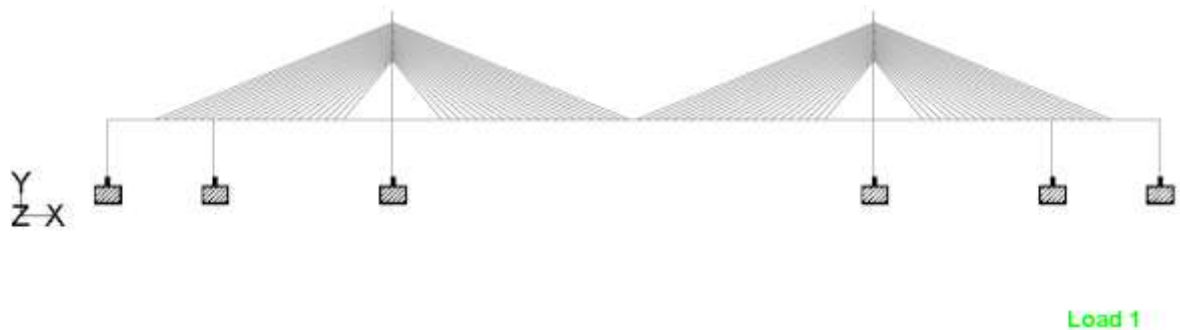
[6] Ingeniería de presas, túneles y puentes, reportaje gráfico: Puente Gilberto Echeverri Mejía (de la 4 sur) – <http://360gradosblog.com>, [citado 16 de septiembre de 2013]

[7] Torsión mecánica, definición: http://es.wikipedia.org/wiki/Torsión_mecánica [actualizado por última vez el 4 junio 2013]

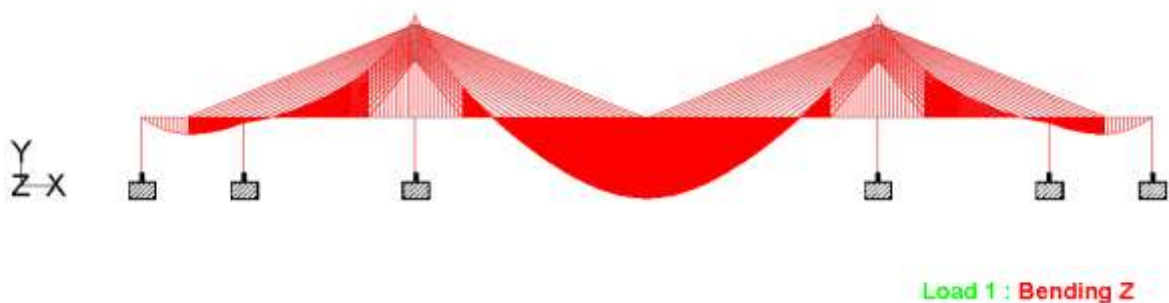
- [8] Documentación suministrada por la oficina de proyecto CARLOS FERNANDO CASADO S.L.
- [9] CSI Analysis Reference Manual. For SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, August 2010.
- [10] CarrionViramonte, F., Hernández Jiménez J; Terán Guillen, J., ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PUENTE ATIRANTADO-EVALUACION DE CABLES, Publicación Técnica No 265, Sanfandila, Qro, 2005, pp 6-10.
- [11] Carrion Viramonte, F., Hernández Jiménez J; Terán Guillen, J., ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PUENTE ATIRANTADO-EVALUACION DE CABLES, Publicación Técnica No 265, Sanfandila, Qro, 2005, pp 19-28.
- [12] Wang Bingjian& Lu Jianming, “Analysis of torsion stiffness and eccentric-loading effect for cable-stayed bridge with large width-to-span ratio”, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering W Tizani (Editor).

ANEXOS

Anexo A. Modelo realizado por el Ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh, P.E. Master of Science in Structures para carga muerta (D) con semejante dimensionamiento longitudinal, localización de apoyos y presenta un atirantamiento sobre el eje central del tablero a modo corroboración de los modelo hechos en CSIBrigde V. 15.



Anexo B. Resultados de los diagramas de momentos para carga muerta (D) del modelo realizado por el ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh.



Anexo C. Resultados de los diagramas de cortante para carga muerta (D) del modelo realizado por el ingeniero Estructural Mostafa Sotoodeh.

