UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

USO DE MATERIALES COMPUESTOS EN PUENTES ATIRANTADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ROBERTO ESPINOSA CONTRERAS

ASESOR
DR. MANUEL JARA DÍAZ

MORELIA, MICHOACÁN **Enero, 2017**

DEDICATORIA

A mis padres, Beatriz y Guillermo, que a pesar de todo creyeron en mí.
Por sus sacrificios, sus consejos y apoyo incondicional, todo lo que soy hoy es gracias a ustedes.

¡Sí se pudo!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme dado la oportunidad de formarme como un profesionista de calidad, así como también a los diferentes docentes que siempre me brindaron sus conocimientos.

Agradezco al Dr. Manuel Jara Díaz, mi asesor de tesis, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y vastos conocimientos, así como su orientación y sus consejos durante el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, agradezco a mis amigos, por el apoyo incondicional que siempre me brindaron día a día en el transcurso de mi carrera universitaria.

ÍNDICE

RESUMEN I
ABSTRACT II
INTRODUCCIÓN III
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES 1
1.1 HISTORIA DE LOS PUENTES EN MÉXICO Y EL MUNDO 2
1.2 DEFINICIÓN DE PUENTE 5
1.3 PARTES QUE INTEGRAN UN PUENTE 6
1.4 CLASIFICACIÓN DE PUENTES 8
1.5 DEFINICIÓN DE PUENTE ATIRANTADO 13
1.6 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN PUENTE ATIRANTADO 14
1.6.1 TABLERO 15
1.6.2 TIRANTES 16
1.6.3 PILAS 18
1.6.4 ANCLAJE 20
1.7 FLUJO DE CARGA EN PUENTE ATIRANTADO 21
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA 23
2.1 GENERALIDADES DEL PROYECTO 24
2.2 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA 25
2.2.1 TABLERO 25
2.2.2 TORRES 27
2.2.3 CABLES DE ACERO 28
2.2.4 CABLES DE FIBRAS DE CARBONO 31
2.2.5 CABLES DE FIBRAS DE BASALTO 31
2.3 MODELO NUMÉRICO EN SAP2000 36
2.3.1 MODELACIÓN DEL TABLERO 36
2.3.2 MODELACIÓN DE LA TORRE CON ELEMENTOS FRAME 40
2.3.3 MODELACIÓN DE TIRANTES CON ELEMENTOS CABLE 41
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS MODAL 42
3.1 ANÁLISIS MODAL 43

3.1.1 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE ACERO 44
3.1.2 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE CARBONO (=R) . 48
3.1.3 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE CARBONO (=K) . 50
3.1.4 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE BASALTO (=R) .. 51
3.1.5 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE BASALTO (=K)... 55
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS BAJO DIFERENTES CASOS DE CARGA 56
4.1 CARGA MUERTA 57
4.1.1 RESPUESTA DEL TABLERO 57
4.1.2 RESPUESTA DE LAS PILAS 61
4.1.3 RESPUESTA DE LOS CABLES 65
4.2 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL 66
4.2.1 RESPUESTA DEL TABLERO 69
4.2.2 RESPUESTA DE LAS PILAS 75
4.2.3 RESPUESTA DE LOS CABLES 79
4.3 ANÁLISIS NO LINEAL 81
4.3.1 RESPUESTA DEL TABLERO 83
4.3.2 RESPUESTA DE LAS PILAS 88
4.2.3 RESPUESTA DE LOS CABLES 91
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS 93
5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL 94
5.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS BAJO CARGA PERMANENTE 96
5.2.1 DESPLAZAMIENTOS 96
5.2.2 ANÁLISIS DEL TABLERO 97
5.2.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS 98
5.2.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES 99
5.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL 100
5.3.1 DESPLAZAMIENTOS 100
5.3.2 ANÁLISIS DEL TABLERO 101
5.3.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS 102
5.3.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES 103
5.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS NO LINEAL 104
5.4.1 DESPLAZAMIENTOS 104

5.4.2 ANÁLISIS DE DEL TABLERO 106
5.4.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS 107
5.4.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES 108
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES 109
6.1 CONCLUSIONES GENERALES 110
BIBLIOGRAFÍA 111

RESUMEN

Los puentes atirantados son relativamente nuevos, ya que su uso es apenas de 60 años, sin embargo, han tenido buena aceptación y su construcción ha crecido de manera exponencial, debido a su eficiencia estructural, economía y estética. En México, los puentes atirantados son cada vez más utilizados, teniendo como insignia, el puente Baluarte que se ostenta como el más alto del mundo. Los puentes tradicionales se construyen con cables de acero de muy alta resistencia, sin embargo, han mostrado problemas con el paso del tiempo, debido fundamentalmente a la corrosión y la fatiga. Es por ello, que se ha tratado de innovar con el uso de otros materiales, buscando una relación costo-beneficio óptima. El uso de nuevos materiales de refuerzo en los tirantes como las fibras de carbono, basalto o vidrio, como alternativa al acero de alta resistencia, se ha estudiado recientemente, debido a las ventajas que poseen dichos materiales frente al acero, tales como alta resistencia en proporción a su peso, propiedades anticorrosivas, mayor resistencia a la fatiga, entre otros. Con el propósito de evaluar el uso de los materiales de fibras, se realizó un análisis del comportamiento que presenta un puente atirantado al emplear éstos nuevos materiales, tomando como base el puente atirantado Río Papaloapan. En un principio se realizó el análisis no lineal del puente con tirantes de acero de alta resistencia, a continuación, se utilizaron cables de fibra de carbono y basalto, aplicando los métodos de igualación de resistencias y rigideces, para obtener secciones equivalentes en los cables y verificar sus propiedades dinámicas y la respuesta del puente ante sismos con características típicas de los registros obtenidos en la costa del Pacífico Mexicano. Los resultados muestran ventajas en su uso y la potencial aplicación en puentes nuevos que eviten la necesidad de sustituir los cables.

Palabras Clave: Puentes atirantados**,** tirantes, fibra de carbono, fibra de basalto, acero de alta resistencia, análisis no lineal

ABSTRACT

Cable-stayed bridges are relatively new since their use is only 60 years, however, they have been well accepted and their construction has grown exponentially due to its structural efficiency, economy and aesthetics. In Mexico, cable-stayed bridges are increasingly being used, bearing as a badge, The Baluarte Bridge which boasts the highest in the world. The traditional bridges are built with very high strength steel cables, however, they have shown problems with the passage of time, mainly due to corrosion and fatigue. It is for this reason that it has been tried to innovate with the use of other materials, looking for an optimum cost-benefit relation. The use of new reinforcement materials in tie rods such as carbon, basalt or glass fibers, as an alternative to high strength steel, has been recently studied, due to the advantages that these materials have against steel, such as high strength in proportion to its weight, anticorrosive properties, and greater resistance to fatigue, among others. With the purpose of evaluating the use of fiber materials, an analysis was made of the behavior of a cable - stayed bridge when using these new materials, based on the Rio Papaloapan cable - stayed bridge. Initially, the non-linear analysis of the bridge with high strength steel tie rods was performed, then carbon fiber and basalt cables were used, applying the methods of equalizing resistances and rigidities, to obtain equivalent sections in the cables and to verify its dynamic properties and the response of the bridge to earthquakes with characteristics typical of the records obtained in the coast of the Mexican Pacific. The results show advantages in its use and the potential application in new bridges that avoid the need to replace the cables.

INTRODUCCIÓN

Los puentes atirantados son cada vez más usados en el mundo debido a que son capaces de salvar grandes claros. Los puentes atirantados se componen de un tablero, un sistema de atirantamiento anclado en diferentes puntos de la pila y el tablero según sea su disposición, una o varias torres, mismas que transmiten los esfuerzos hacia la cimentación.

Este proyecto tiene como finalidad el reemplazo de los cables de acero de alta resistencia del puente atirantado, por cables de fibras de carbono y fibras de basalto mediante el criterio de igualación de resistencias y rigideces (Wu y Wang, 2008), y estudiar cómo se comporta con diferentes excitaciones sísmicas en la base, para obtener las respuestas mecánicas, momentos flexionantes y cargas axiales presentes en la estructura, con el fin de obtener el material más apropiado para la construcción de este tipo de estructuras.

Empleando el programa SAP2000, se realizó un análisis modal, un análisis modal espectral y un análisis no lineal para obtener los desplazamientos, momentos flexionantes y carga axial que se presentan en los distintos componentes de la estructura. Además, se utilizó el programa PRODISIS para generar los acelerogramas sintéticos necesarios para el análisis modal espectral y no lineal.

El presente trabajo se realizó tomando como base el puente atirantado Río Papaloapan, ubicado en Veracruz, pero debido a la falta de información específica, algunos datos fueron supuestos.

OBJETIVO

Realizar una comparación de las diferentes respuestas de un puente atirantado cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono y cables de fibra de basalto.

CAPÍTULO 1
ANTECEDENTES

1.1 HISTORIA DE LOS PUENTES EN MÉXICO Y EL MUNDO

Desde la antigüedad, cuando el hombre formó los primeros asentamientos, comenzó a explotar los recursos naturales a su alrededor, y pronto se dio cuenta que el intercambio de dichos recursos era de suma importancia. La necesidad de transportar los recursos de un lugar a otro lo llevó a crear caminos, encontrando obstáculos a su paso, tales como ríos, acantilados y otros accidentes geográficos, algunos insalvables con los medios a su alcance. Desde entonces, ha buscado la manera de vencer dichos obstáculos.

De todas las estructuras diseñadas por el hombre, los puentes han sido el resultado de los más sofisticados logros de la ingeniería de cada época. A partir de los puentes rudimentarios hechos a base de troncos y montones de piedra, el hombre fue mejorando sus habilidades, y con estás, los materiales para su construcción. Con el transcurso del tiempo, el hombre se dio cuenta que éste tipo de estructuras eran mucho más sólidas si colocaba pilas de piedra –a manera de cimentación–, lo que resultó de gran importancia, ya que de ésta manera, los puentes eran mucho más estables y resistentes al peso que debían soportar y a la corriente de los ríos.

El puente más antiguo del que se tiene registro es el “Clam Bridge”, ubicado en Wycoller, un poblado de Lancashire al noroeste de Inglaterra. De aspecto tosco y simple, se cree que fue construido durante el periodo neolítico, ya que sus continuas remodelaciones han hecho imposible saber la fecha exacta de su construcción.

La civilización romana fue la primera cultura en construir puentes de manera regular. La necesidad de tener una red de calzadas que le permitieran comunicar su imperio de manera eficiente, hizo que los ingenieros romanos construyeran una gran cantidad de puentes para salvar ríos y valles. La organización del Imperio Romano normalizó las técnicas constructivas de forma que se pueden observar construcciones muy semejantes a miles de kilómetros de separación. Los romanos fueron precursores del cemento hidráulico; además de usar ampliamente el arco y la bóveda para la construcción de puentes y cúpulas. El Puente Romano de Orense, también conocido como Ponte Romana o Ponte Vella, es el de mayor luz construido en piedra por ellos, con 370 metros de claro (Historia del puente en España, 1980).

También fueron pioneros en los puentes de arco de madera, caso del Puente de Trajano, con los cimientos de piedra y la arcada de madera que permitió luces de 52 metros, teniendo en total una longitud de 1,130 metros, siendo por muchos siglos el puente más largo.

Por muchos años la ingeniería mostró avances significativos; aun así el arco perduró con mínimas variaciones. Mientras tanto, el Imperio Inca perfeccionaba la construcción de puentes de cuerda, que serían los precursores de los puentes colgantes. No fue hasta finales del siglo XVII cuando se comenzó a sustituir la madera y la piedra por el hierro fundido. Tal es el caso del Puente de Coalbrookdale en Inglaterra, el cual fue el primer puente en arco construido a base de hierro fundido (Construcción Civil, 2012). Su construcción dio inicio en 1777, como parte de una ambiciosa apuesta para construir un puente sobre el cual pasaría una carretera; su construcción finalizó en 1779. A pesar de las dudas que se tenían respecto al relativamente desconocido material, el puente demostró ser lo suficientemente resistente tras desbordarse el río Severn en 1795, destruyendo a la mayoría de los puentes que cruzaban sus aguas, excepto el puente Coalbrookdale.

En 1823 apareció un nuevo tipo de puente: el puente colgante. El Puente Colgante de Menai, ubicado entre la isla de Anglesey y Gales, al noroeste de la costa de Gales, es uno de los primeros en su tipo (Abad, 2013). Consta de dos enormes torres unidas por dieciséis cadenas de cables que soportan una longitud de 176 metros.

Para 1883, el puente de Brooklyn terminaba su construcción, con una longitud de 1825 metros, un claro entre pilas de 486.5 metros y suspendido mediante cables de acero, se convertía en el puente colgante más grande del mundo (Martija, 2007). El Puente de Brooklyn une los distritos de Manhattan y Brooklyn, en la ciudad de Nueva York. En 1937, se termina el puente Golden Gate, suspendido de dos torres de 227 metros de altura y un claro de 1280 metros, ubicado en California, Estados Unidos, une la península de San Francisco por el norte con el sur de Marin.

El ferrocarril, como nuevo medio de transporte y como uno de los pilares fundamentales para el desarrollo industrial, aceleró todavía más el desarrollo de los puentes, siendo éstos cada vez más grandes, con diseños más elaborados y técnicas de construcción más avanzadas.

Considerada una obra maestra de la ingeniería, El Forth Rail Bridge es un puente ferroviario que cruza el Fiordo de Forth a 14 kilómetros del centro de Edimburgo, al este de Escocia. Diseñado por John Flower y Benjamin Baker, es uno de los monumentos más reconocibles de Escocia, fue inaugurado en 1890 por el Príncipe de Gales. Tiene 2.5 kilómetros de longitud y una doble vía de ferrocarril que se eleva 46 metros sobre el nivel del agua. Consta de dos tramos principales de 520 m, dos tramos laterales de 200 m, 15 tramos de 51 m y cinco de 7.6 m. Cada tramo principal tiene dos ménsulas centrales de 104 m de altura que descansan sobre pilares de 21 m de diámetro. Los cimientos del extremo sur del puente fueron construidos mediante *caissons (*pozo de cimentación) bajo aire comprimido, a una profundidad de 27 m. Se emplearon 55,000 toneladas de acero, y gran parte del trabajo realizado no tenía precedentes en aquel entonces, como los cálculos de tensiones durante su elevación, cálculos de resistencia al viento o los cambios de temperatura de la estructura, entre otros.

El puente Hohenzollern se construyó sobre el río Rin entre 1907 y 1911 en la ciudad de Colonia, Alemania. Es el puente ferroviario más utilizado de Alemania por su estratégica ubicación, dado que se encuentra entre la Estación Central de Colonia y la de Colonia Messe/Deutz. Hohenzollern fue uno de los puentes más importantes para Alemania durante la Segunda Guerra Mundial. Tiene una longitud total de 409.19 m y un ancho de 26.2 m, consta de tres secciones, una de 118.88 m, otra de 167.75 m y finalmente una de 122.56 m (Stadt Köln, 2016).

Como se observa, la evolución de los puentes se debe principalmente a los cambios que han tenido los medios de transporte a lo largo de la historia, siendo los ferrocarriles y los vehículos de motor la principal razón de su cambio, debido a sus dimensiones, peso, velocidad y volumen de tránsito.

En México, tanto la topografía como la hidrología han exigido puentes muy variados y espectaculares en cuanto a su tipo, tamaño y forma. El puente de piedra de San Miguel Tequixtepec, Oaxaca, es el más antiguo de México. Construido con cantera, muy bien labrada, colocada *“a hueso”* (Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, 2016). El puente tiene grabados en glifos prehispánicos, lo que demuestra que el puente se construyó a finales del siglo XVI.

En 1886, en el centro de Monterrey se construyó El puente Juárez, el cual sorteaba “el Canalón”, que fue un canal construido para evitar brotes de enfermedades. Construido a base de piedra, fue el primer puente en Monterrey calculado por un ingeniero y construido con materiales duraderos (Téllez, 2013).

El Puente de Arcediano fue el primer puente colgante en México, ubicado en la comunidad de Arcediano en Huentitán, perteneciente al Municipio de Zapopan, Jalisco. Fue construido en 1894 para cruzar el Río Grande de Santiago, Guadalajara. Construido a base de materiales que había en el lugar, su estructura era de piedra y mampostería, a excepción de los cables, que eran de acero (Pérez, 2011).

En 2012 finaliza la construcción del Puente Baluarte Bicentenario, el cual es uno de los proyectos de infraestructura más emblemáticos de México. Es el puente atirantado que salva el claro más alto del mundo, ubicado en los municipios de Pueblo Nuevo en Durango y Concordia en Sinaloa, a lo largo de la Autopista Durango-Mazatlán. Tiene una longitud de 1,124 metros, un claro atirantado de 520 metros y una altura de hasta 402.57 metros. Su estructura cuenta con doce apoyos principales y once claros, además de un sistema de tirantes en abanico de 152 piezas (México, 2016).

1.2 DEFINICIÓN DE PUENTE

Estructura con longitud mayor de 6 metros formada por un conjunto de elementos combinados en forma sistemática, que realizan la función de enlace y continuidad de una vía de comunicación, permitiendo salvar accidentes geográficos. Cuando un obstáculo por salvar es menor a 6 metros, se denomina alcantarilla. En las interacciones con barrancas sin tirantes de agua se denominan viaductos, y cuando se requiere interceptar vías terrestres, son llamados paso a desnivel.

1.3 PARTES QUE INTEGRAN UN PUENTE

SUPERESTRUCTURA

Es la parte del puente que cubre los claros entre apoyos. Está formada por elementos que soportan directamente las cargas móviles y tiene como función transmitir dichas cargas hacia la subestructura. Se compone de: calzada o superficie de rodamiento, banquetas, guarnición y trabes.

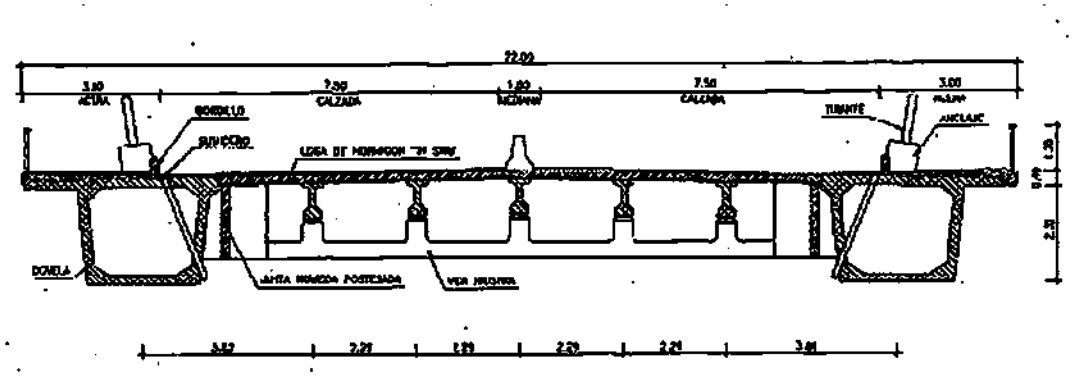


Figura 1. 1 Superestructura.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

SUBESTRUCTURA

Conjunto de elementos que transmiten las cargas de la superestructura y su propio peso a la infraestructura. Se componen de: columnas, pilas, caballetes, etc.

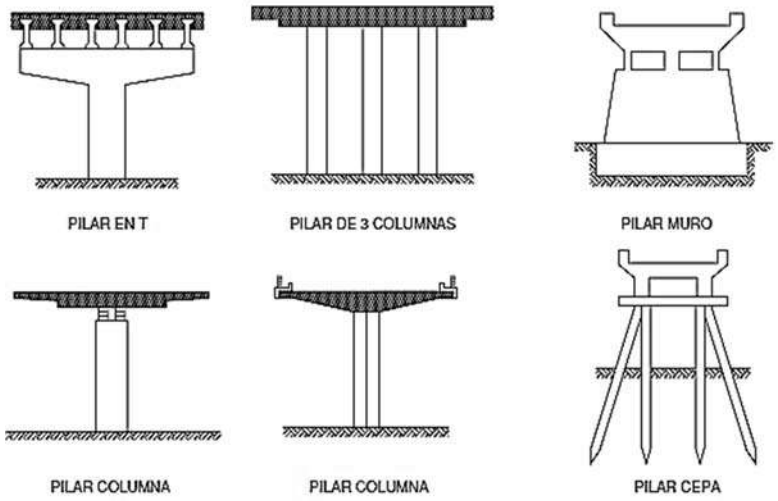


Figura 1. 2 Tipos de Subestructura.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

INFRAESTRUCTURA

Es el conjunto de elementos encargados de transmitir directamente al suelo las cargas provenientes de la subestructura. De acuerdo con la capacidad del suelo, la infraestructura puede ser superficial o profunda.

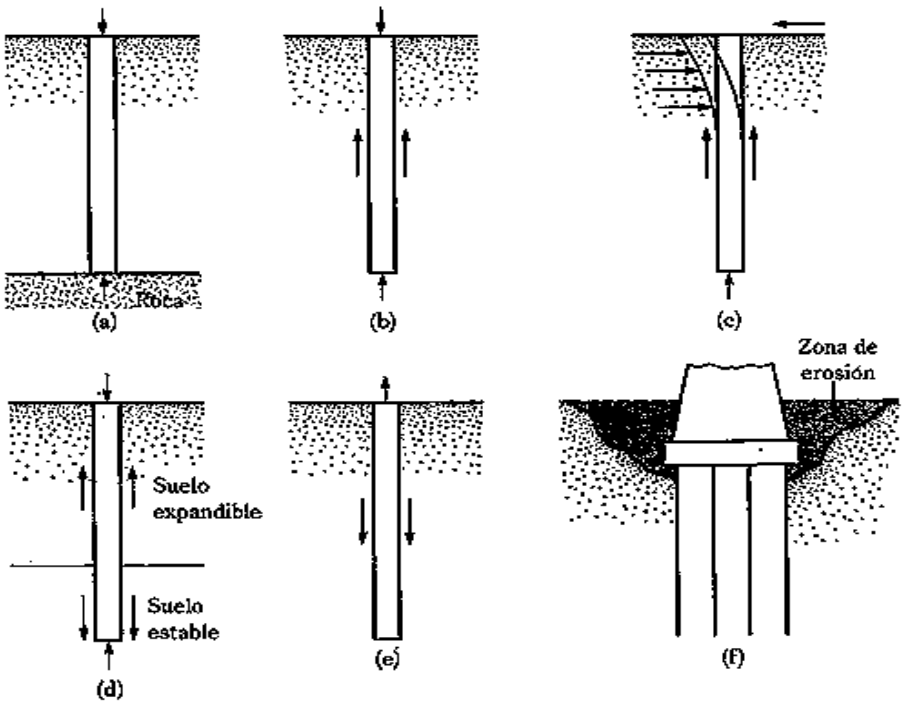
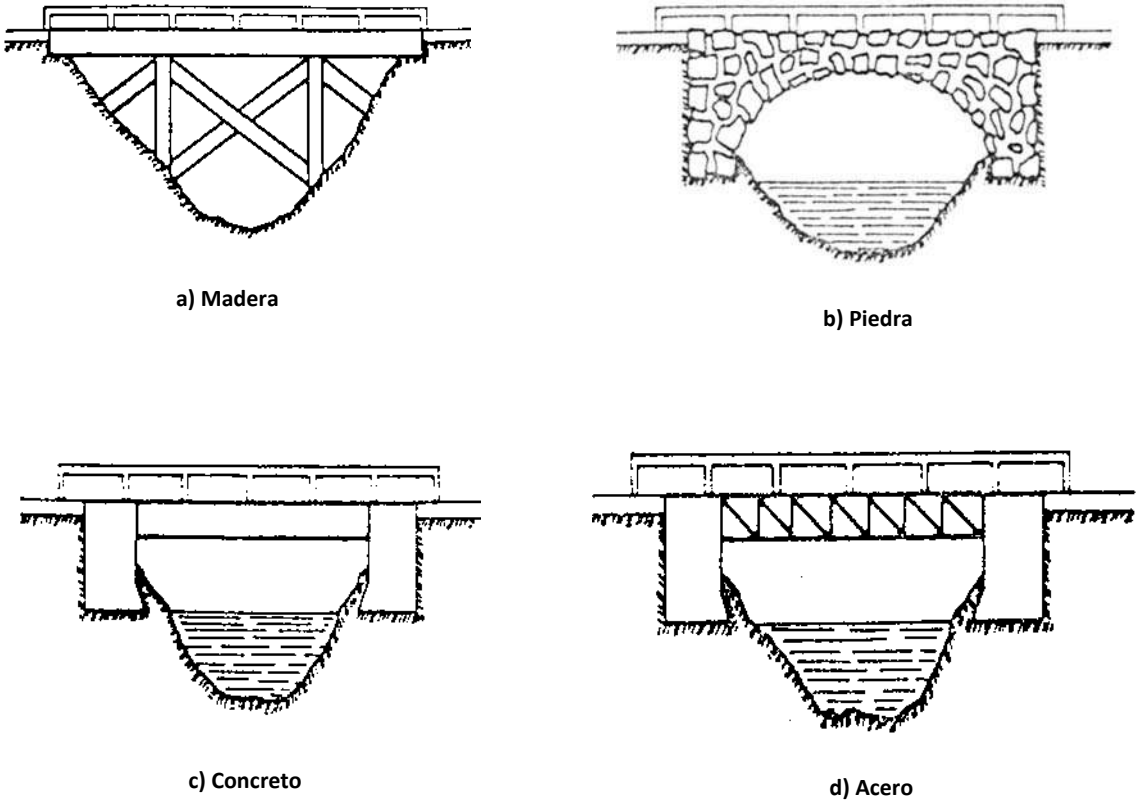


Figura 1. 3 Tipos de Cimentación.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

1.4 CLASIFICACIÓN DE PUENTES

Los puentes pueden clasificarse de diferentes maneras:

Tipo de materiales



a) Madera

b) Piedra

c) Concreto

d) Acero

Figura 1. 4 Tipos de Materiales.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

Sistema constructivo

Puentes en Ménsula

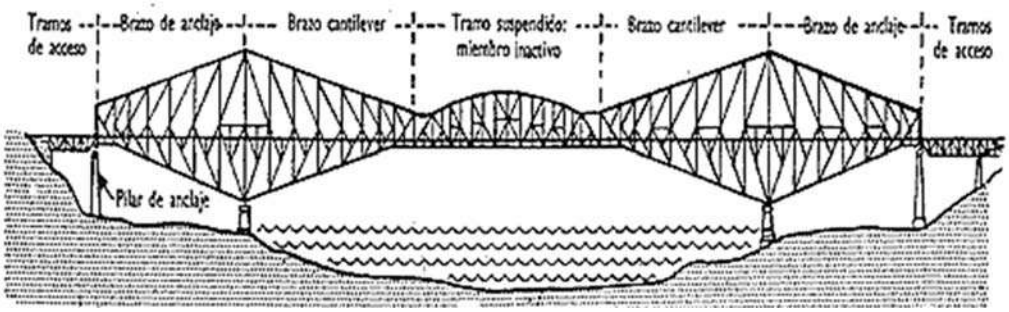
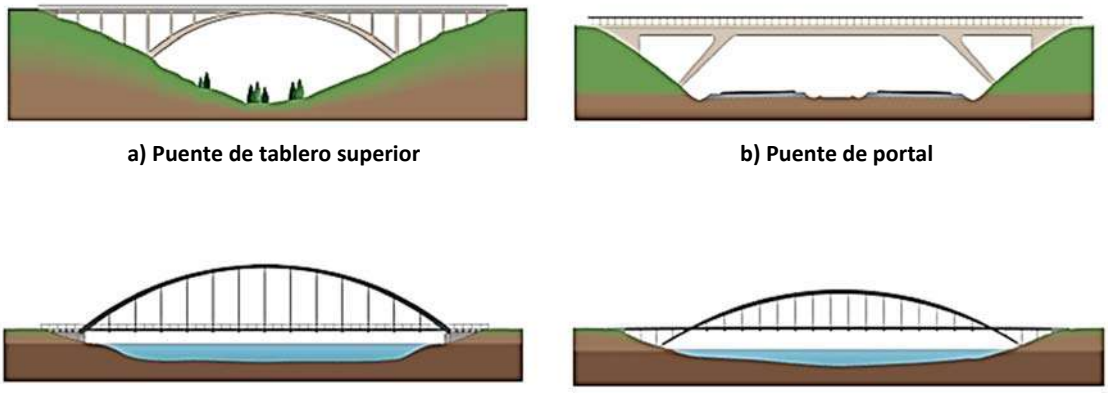


Figura 1. 5 Puente en Ménsula o Cantiléver,
(Granja García & López Crisanto, 2014)

Puentes en Arco



a) Puente de tablero superior

b) Puente de portal

c) Puente de tablero inferior

d) Puente de tablero intermedio

Figura 1. 6 Tipos de puente en arco

Puentes Viga

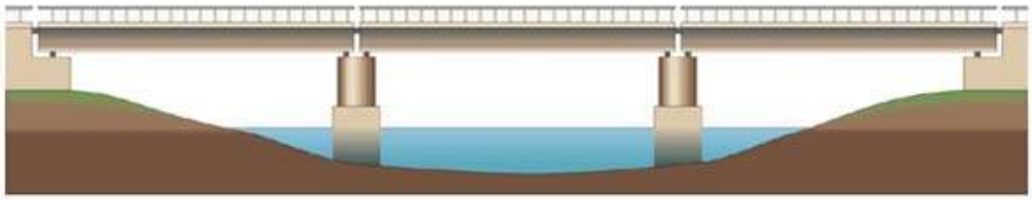


Figura 1. 7 Puente de viga de varios tramos

Puentes Colgantes

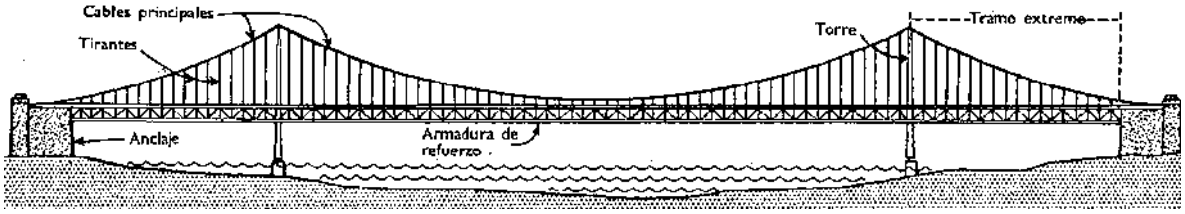


Figura 1. 8 Puente colgante y sus elementos

Puentes Atirantados

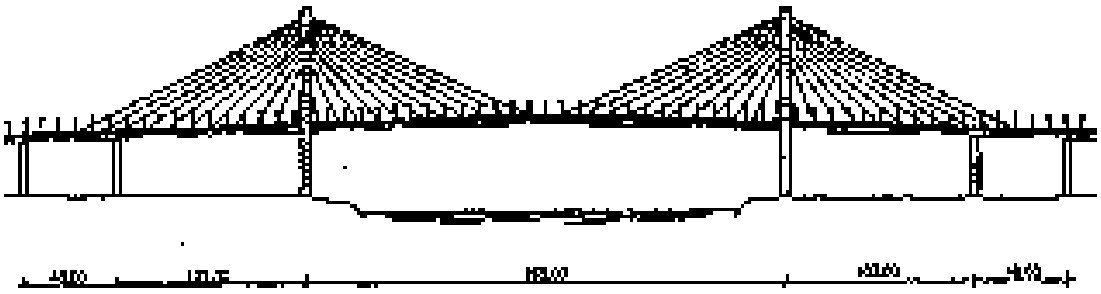


Figura 1. 9 Puente Atirantado

Según el ángulo del eje del puente con respecto a la corriente de agua

Puentes rectos (Ángulo de esviaje de 0°)

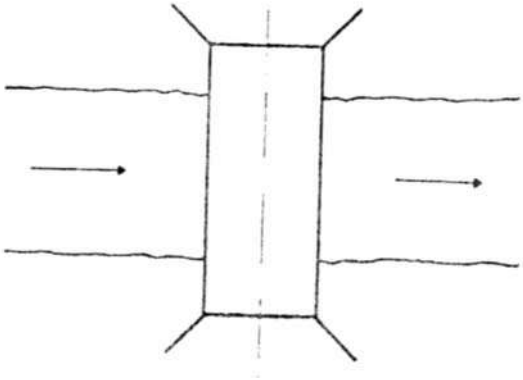


Figura 1. 10 Puente perpendicular al cauce del río.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

Puentes enviajados

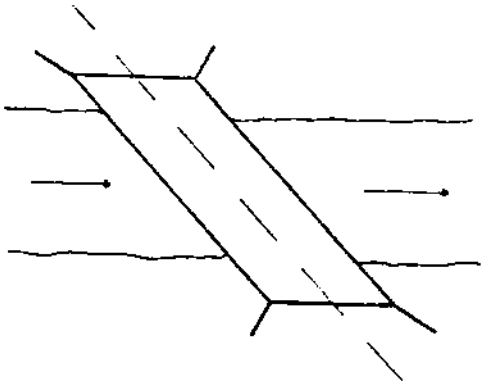


Figura 1. 11 Puente con cierto grado de esviaje.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

Puentes Curvos

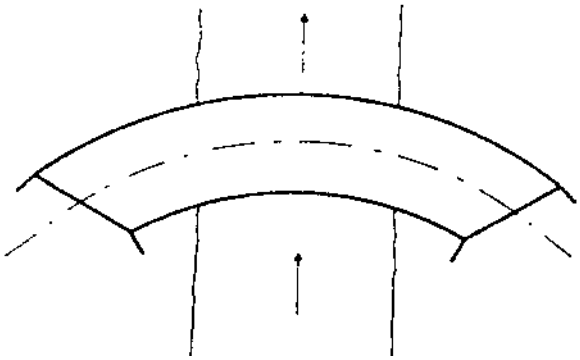


Figura 1. 12 Puente en curva horizontal.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

Por la movilidad de la superestructura

Fijos

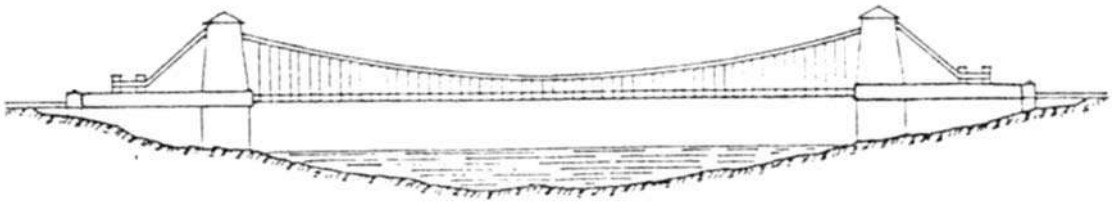
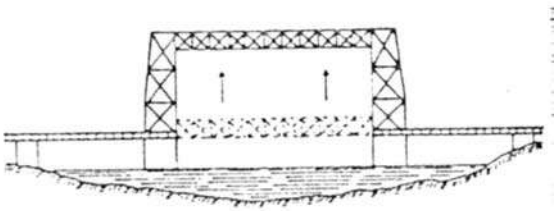
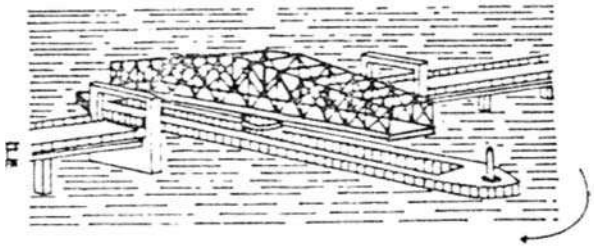


Figura 1. 13 Puente fijo.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

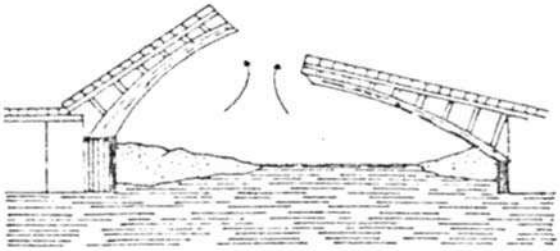
Movibles



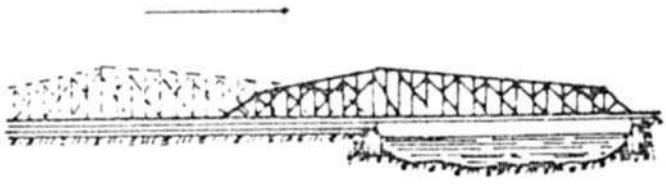
a) Levadizo



b) Giratorio



c) Basculante



d) Deslizante

Figura 1. 14 Puentes con diferentes tipos de movilidad.
(Granja García & López Crisanto, 2014)

1.5 DEFINICIÓN DE PUENTE ATIRANTADO

Se le denomina Puente Atirantado a aquel cuyo tablero está suspendido de uno o varios pilones centrales mediante cables de acero llamados tirantes o torones. Los puentes atirantados trabajan a tensión y compresión, a diferencia de los puentes colgantes, los cuales trabajan principalmente a tensión. Existen variantes en cuanto a la ubicación de los tirantes con respecto al tablero, ya que estos se pueden encontrar en la parte central o en los extremos del tablero como se muestra en la figura 1.15.

Figura 1. 15 Puente "Baluarte Bicentenario"
De: www.sedesol.gob.mx

1.6 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN PUENTE ATIRANTADO

Los puentes atirantados se componen de cuatro elementos principales:

- El tablero
- Los cables o tirantes
- Las pilas
- Los anclajes

Estos elementos tienen una relación íntima entre sí, ya que entre ellos se reparten la carga de forma que, en un caso extremo, el tablero sea estructuralmente resistente para soportar la mayoría de la carga con pilas de poca capacidad y pocos tirantes (figura 1.16). Por otra parte, el tablero puede tener una mínima capacidad de carga, en tanto la pila y un número suficiente de cables sean los que resistan la mayor carga (figura 1.17).

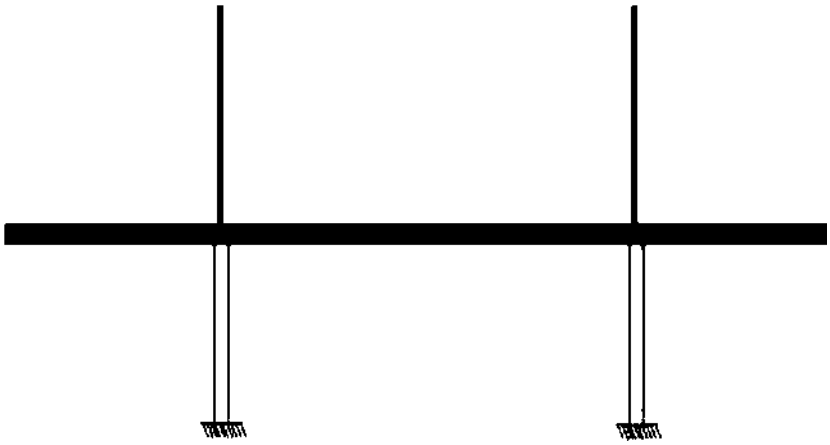


Figura 1. 16 Tablero de alta capacidad estructural y sistema de atirantamiento de baja capacidad estructural

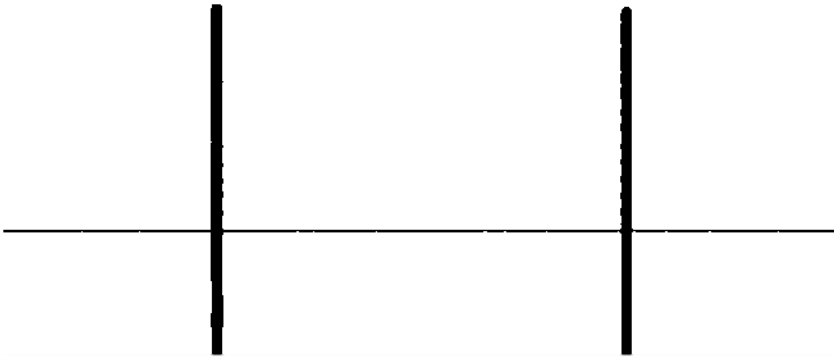


Figura 1. 17 Tablero de baja capacidad estructural y sistema de atirantamiento con alta capacidad estructural

1.6.1 TABLERO

El tablero forma parte del esquema básico de la estructura del puente atirantado, ya que debe resistir los esfuerzos horizontales que le transmiten los tirantes (figura 1.18). Estas componentes por lo general se equilibran en el propio tablero dado que su resultante, al igual que en los pilones, debe ser nula.

La sección transversal del tablero depende principalmente del acomodo de los tirantes sobre éste. Cuando los tirantes están situados en el eje central del tablero, generalmente se dispone de un cajón cerrado con voladizos laterales para proporcionar rigidez a torsión al sistema; por otra parte, cuando los tirantes están situados en los extremos del tablero, éste está formado por dos vigas longitudinales situadas en los bordes, conectadas entre sí por vigas transversales las cuales se encargan de soportar la flexión. No obstante, en ciertos casos pueden llegar a invertirse dichos tipos de tableros para cada disposición de tirantes.

Figura 1. 18 2013. Puente Baluarte Bicentenario
Colocación de sección prefabricada de tablero
De: www.sedesol.gob.mx

1.6.2 TIRANTES

Los tirantes se pueden organizar de diversas formas en el tablero. En primer lugar, es necesario definir el número de tirantes en cada claro y la distancia entre los puntos de anclaje de los tirantes en el tablero. El número de tirantes es una de las cuestiones que más ha evolucionado en los puentes atirantados. Los primeros tenían pocos tirantes, con separación entre anclajes que llegó a pasar de los 50 m; se trataba de crear una serie de apoyos intermedios para convertir un puente de claros grandes en uno de claros medianos.

En los puentes atirantados actuales el número de tirantes es mucho mayor que en los antiguos, se utilizan distancias entre anclajes que varían entre cinco y veinte metros, de forma que la flexión local debida a la distancia entre los apoyos generados por los tirantes, es insignificante respecto a la flexión que se produce por la deformación general de la estructura. Si en un principio la finalidad de los tirantes era crear una serie de apoyos adicionales al tablero, para transformar un puente de claros grandes en uno de claros medios, este planteamiento ha cambiado hasta considerar a los tirantes como un medio de apoyo casi continuo y elástico del tablero.

Definido el número de tirantes, es necesario definir la geometría de cada uno de los haces, es decir, del conjunto que desde una torre atiranta un semiclaro, un claro principal, o un claro de compensación. A los tirantes paralelos se les ha llamado disposición en arpa (figura 1.19) y a los tirantes radiales, en abanico (figura 1.20). Transversalmente al eje longitudinal del puente, los tirantes pueden arreglarse en uno o dos planos con respecto a la línea central longitudinal del puente (figura 1.21). Los tirantes radiales o divergentes funcionan mejor que los paralelos, porque el atirantamiento es más eficaz y las flexiones en la torre menores. Los paralelos se han utilizado con frecuencia cuando la compensación del tablero se divide en claros pequeños, de forma que los tirantes del haz de compensación se anclan directamente sobre pilas o muy cerca de ellas. De esta forma el atirantamiento es más rígido y las flexiones en la torre y en el claro principal disminuyen.

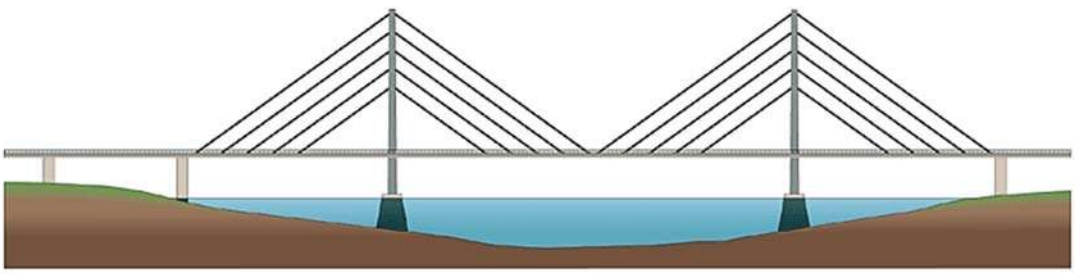


Figura 1. 19 Tirantes tipo Arpa

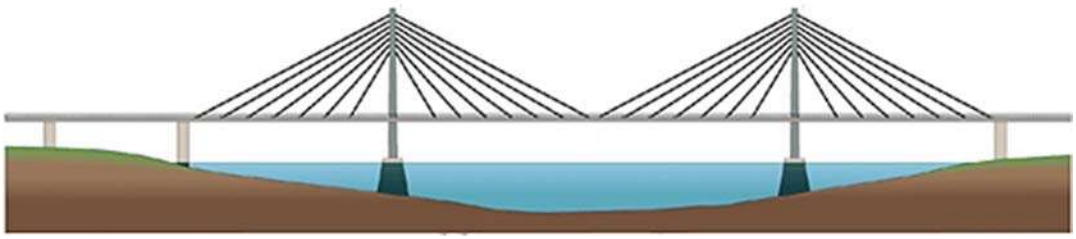


Figura 1. 20 Tirantes tipo Abanico

a) Tirantes al centro del tablero

b) Tirantes en los extremos del tablero

Figura 1. 21 Ubicación de los tirantes en el tablero.
www.arquitecturaenacero.org

1.6.3 PILAS

Las pilas forman parte de la subestructura, haciendo la función de apoyos intermedios en los tableros. Deben soportar y transmitir la carga permanentemente y accidental hacia los cimientos (figura 1.22). En los puentes atirantados con planos de atirantamiento en dos sentidos, las pilas forman parte de las torres. Las torres son la parte más importante dentro de la estructura de los puentes atirantados, ya que estas son las que van a soportar toda la carga que se ha de distribuir del tablero a los cables y estos a las torres, las cuales pueden tener diferentes formas geométricas, dependiendo de la configuración de los tirantes como se muestra en la figura 1.23

Figura 1. 22 Pilas de concreto reforzado.
www.ulmaconstruction.es

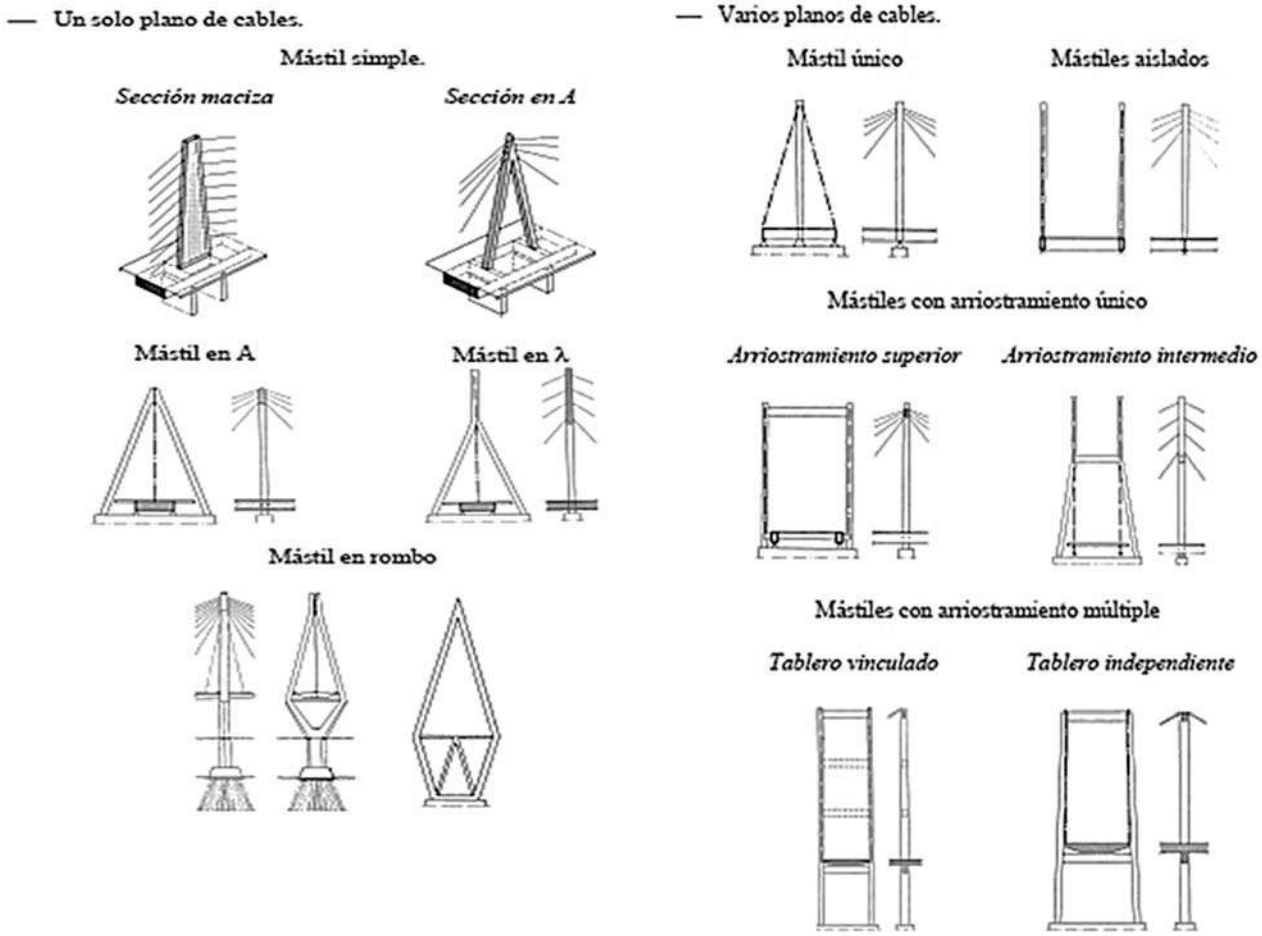


Figura 1. 23 Tipos de torres.
http://caro-chavez.blogspot.mx/

1.6.4 ANCLAJE

En los puentes atirantados existen dos elementos estructurales que se consideran críticos: los tirantes y los elementos de anclaje de los tirantes (Viramontes, 2005). El desarrollo tecnológico en torno a estos dispositivos es determinante cuando se habla de puentes atirantados. Desde una visión general, para su diseño hay dos objetivos fundamentales que se buscan: en primer lugar, asegurar que las tensiones de los cables se pueden controlar durante el proceso constructivo y mantenerlos durante su vida en servicio. En segundo lugar, está asegurar la integridad de los cables y los elementos de sujeción para que factores ambientales y externos no afecten su resistencia o capacidad estructural. En este último caso, uno de los principales problemas es la corrosión.

Los elementos de anclaje en general son diseños patentados cuyo fabricante establece los procedimientos de tensado de tal forma que se controle la tensión final y el perfil del tablero. Evidentemente, el diseño del sistema de anclaje depende del tipo de tirantes utilizados; en la figura 1.24 se muestran tres tipos diferentes de sistemas para barras, alambres y tendones.

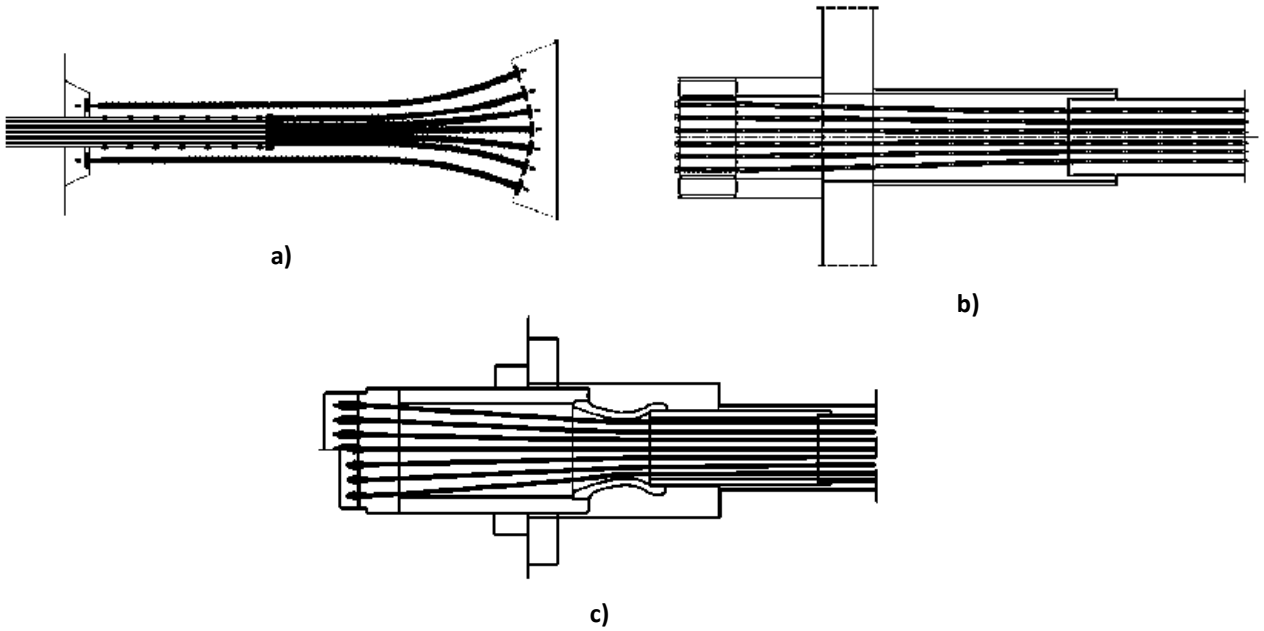


Figura 1. 24 Diseños típicos para los sistemas de anclaje para a) Barras, b) Alambres y c) Tendones. (Carrión et al., 2005)

1.7 FLUJO DE CARGA EN PUENTE ATIRANTADO

El tablero es soportado elásticamente en varios puntos a lo largo de su extensión por cables fijados a las torres, las cargas permanentes y móviles son transmitidas a las torres mediante los tirantes, con una estructura reticulada trabajando a tensión, comprimiendo el tablero rigidizándolo y aportándole mayor resistencia (figura 1.25).

La torre y el tablero quedan comprimidos, por lo que aumenta su capacidad de carga y su resistencia a esfuerzos de cargas cortantes y dinámicas (Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados, 2006). La torre se construye con una geometría proporcional al alcance de los tirantes y claro a cubrir, recibe y transmite las cargas como acciones verticales a la cimentación, además de ser responsable por la estabilidad de la estructura, pues leves variaciones de su posición, generarían sobreesfuerzo en unos tirantes, y relajamiento en otros, con consecuencias como pandeo o rotación alrededor del eje longitudinal del puente. Debido al alto grado de hiperestaticidad presente en los puentes atirantados y a su flexibilidad, la introducción de carga en un tirante afecta a la carga presente en el resto de tirantes y con ello a la distribución de esfuerzos en la estructura. Por lo tanto, el objetivo del puente es mantener la torre en posición de equilibrio respecto a la estructura.

La resistencia de un puente atirantado depende de sus cables, ya que estos son los que sostienen los segmentos y a su vez la estructura, por lo tanto, de ello depende la integridad física del puente, depende la calidad con que se hicieron los cables y su flexibilidad, también por la rigidez de la torre que es la que sostiene a los cables, es decir, la obra funciona en torno a los cables.

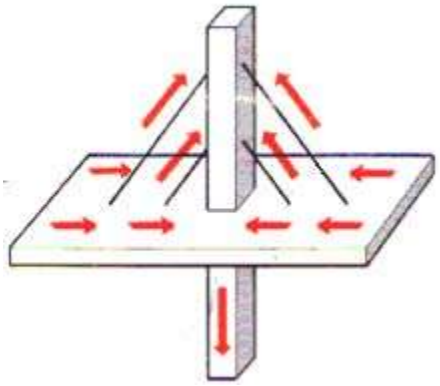


Figura 1. 25 Dirección de las fuerzas

Como se puede apreciar en la figura 1.26, la transmisión de cargas se rige bajo determinado orden.

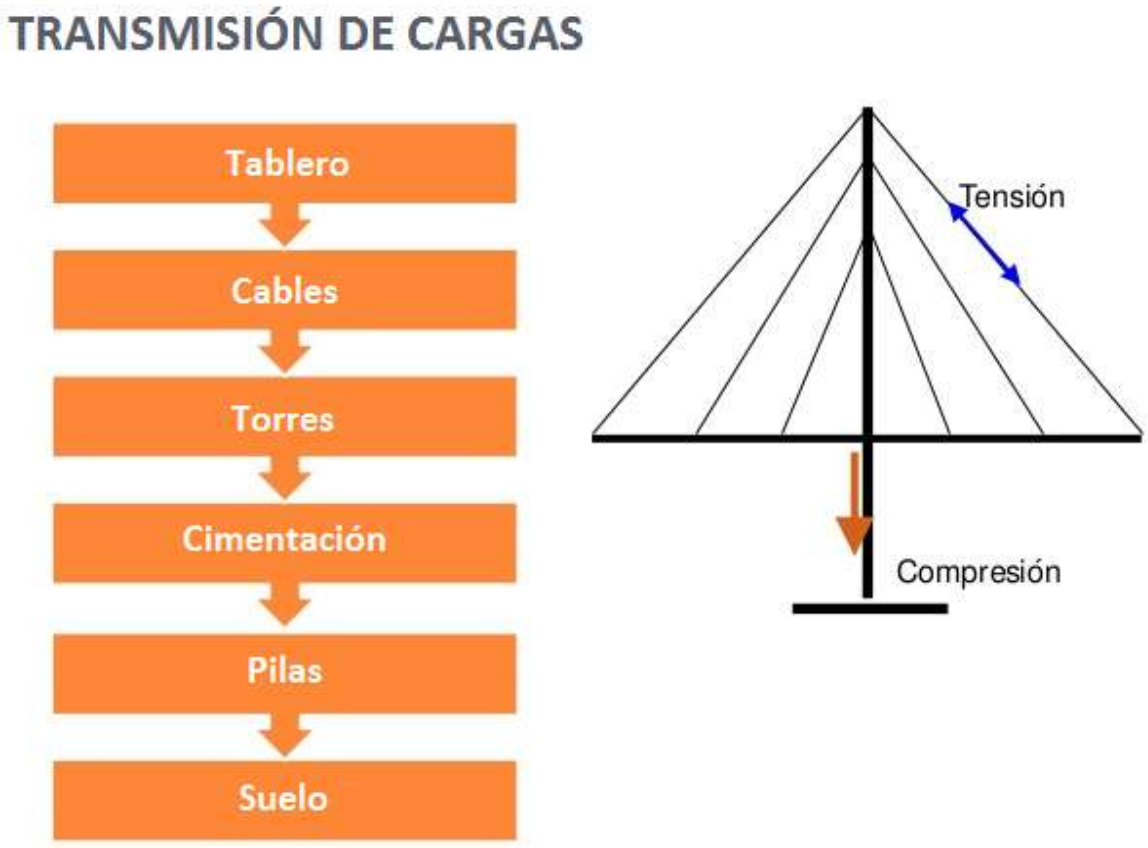


Figura 1. 26 Transmisión de cargas.
(El-abd, 2015)

CAPÍTULO 2
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

2.1 GENERALIDADES DEL PROYECTO

Para realizar el estudio del comportamiento de los puentes atirantados con distintos materiales en los cables, se decidió utilizar como puente prototipo, un puente semejante a los que se han construido en el país. Para tal efecto, se eligió el puente atirantado Río Papaloapan (Carrión et al., 2005), ubicado en el km 85+750 de la autopista Minatitlán-Córdoba sobre el Río Papaloapan, en el estado de Veracruz (figura 2.1). Debido a la falta de información específica respecto a su geometría, algunos datos fueron supuestos, lo que no es preocupante pues, tal y como se menciona anteriormente, la intención es estudiar un puente semejante a los que se han construido en México.

El puente tiene un claro de 342.7 m, el cual es soportado por dos torres con dos pilas laterales cada una, consta de cuatro semi-arpas simétricas en cada uno de los planos laterales. Cada semi-arpa del puente tiene 14 tirantes, lo que da un total de 112 tirantes en todo el puente (figuras 2.2).

Figura 2. 1 Puente Río Papaloapan.
(Carrión et al., 2005)

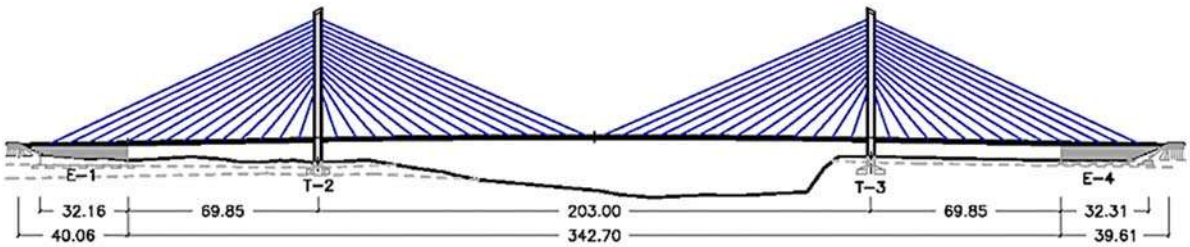


Figura 2. 2 Disposición de tirantes. (Carrión et al., 2005)

2.2 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA

Para definir la forma de un puente, se empieza por conocer las condiciones físicas, topográficas, climáticas, viales, etc. Una vez conocidos todos los factores, se procede a plantearse una serie de anteproyectos geométricos que dan lugar a una gran variedad de formas tanto para el tablero como para la o las torres.

La geometría general de la estructura concuerda con los datos recopilados del Puente Río Papaloapan, sin embargo, por falta de información, algunas dimensiones han sido supuestas para lograr la realización del modelo y del análisis.

2.2.1 TABLERO

El tablero consta de 5 tramos, los cuales tienen la siguiente distribución:

En ambos extremos del puente hay dos tramos con una longitud de 32 m para la sujeción de los tirantes de anclaje, el claro central o principal entre las dos torres, es de 203 m de longitud, además se tienen dos tramos de 70 m de longitud a cada lado de la torre. Todos los tramos salvan una longitud total de 407 metros (figura 2.3). El tablero tiene un ancho uniforme en toda su extensión de 23.4 m, a excepción de la zona de las pilas, donde el ancho se reduce 3 m para rodearlas, ya que no existe conexión entre el tablero y las pilas.

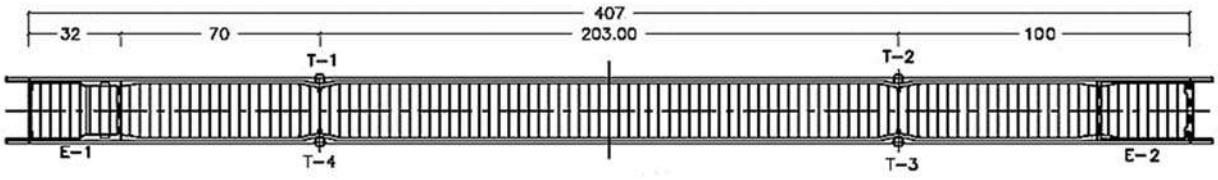


Figura 2. 3 Tablero.
(Carrión et al., 2005)

El tablero está conformado por 3 elementos principales:

Trabes longitudinales

Ubicadas en los extremos del tablero, tienen una sección transversal sólida de 1.25 x 1.25 m constante a todo lo largo del puente (Carrión et al., 2005). En el modelo fueron divididas tramos de 6 metros de longitud (figura 2.4).

Trabes transversales

Se encuentran a lo ancho del tablero, con una sección transversal constante de 1 x 0.30 m, y una longitud de 20.90 metros de paño interior a paño interior de las trabes longitudinales (figura 2.5) (Carrión et al., 2005).

Losa

Se extiende a lo largo de todo el tablero, con un espesor constante de 12 cm y un área de 22.4 x 6 metros (figura 2.6) (Carrión et al., 2005).

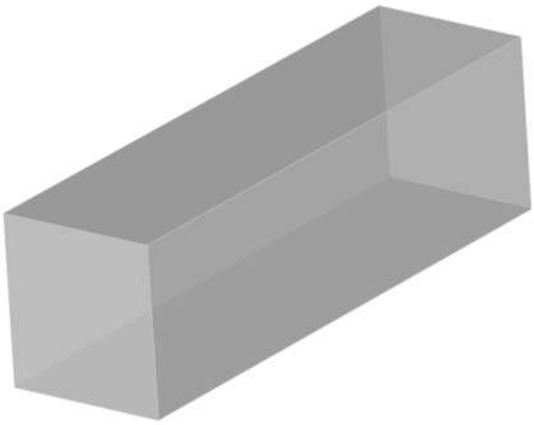


Figura 2. 4 Sección de trabe longitudinal

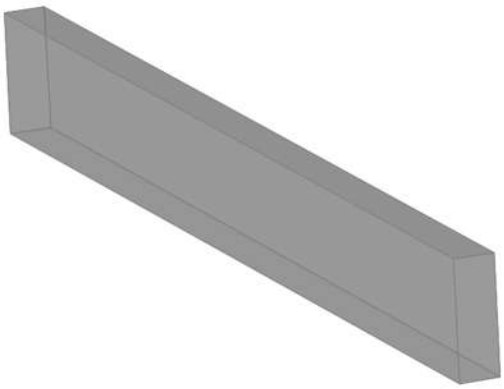


Figura 2. 5 Sección tipo de trabe transversal

Figura 2. 6 Sección tipo de losa

2.2.2 TORRES

El puente consta de 2 torres en forma de H, con dos pilas laterales cada una, como se muestra en la figura 2.7. Cada torre consta a su vez de un contraventeo en la parte inferior, para proporcionarle mayor rigidez transversal a la torre en su base. El tablero no se apoya directamente sobre la trabe transversal que se ubica en la parte inferior de la torre, por lo que éste queda suspendido. El sistema de contraventeo que aporta rigidez a la torre tiene la siguiente disposición:

Trabe trasversal: de 0.8 x 0.3 m y una longitud de 20.90 metro metros (de paño interior a paño interior de las pilas laterales).

Elementos diagonales: están conectados en uno de sus extremos a la pila lateral y en el otro a la cimentación, con medidas de 1 x 0.40 m y una longitud de 11.42 metros.

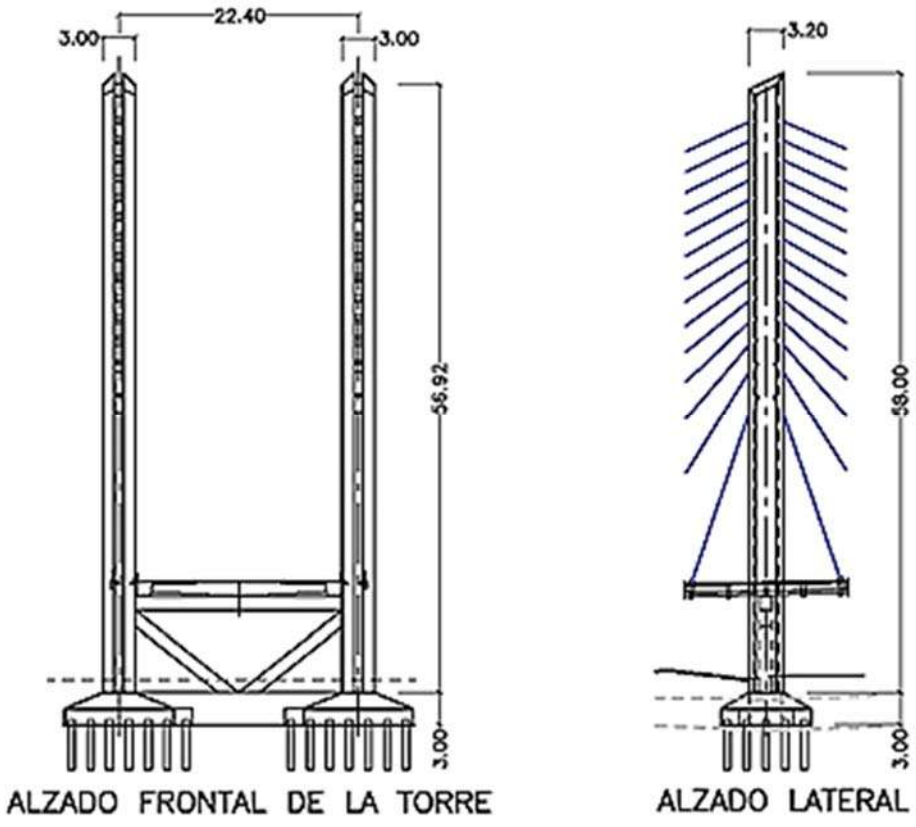


Figura 2. 7 Geometría de la torre. (Carrión et al., 2005)

Las dimensiones de la sección transversal de las pilas son constantes en toda su longitud y se muestran en la figura 2.8.

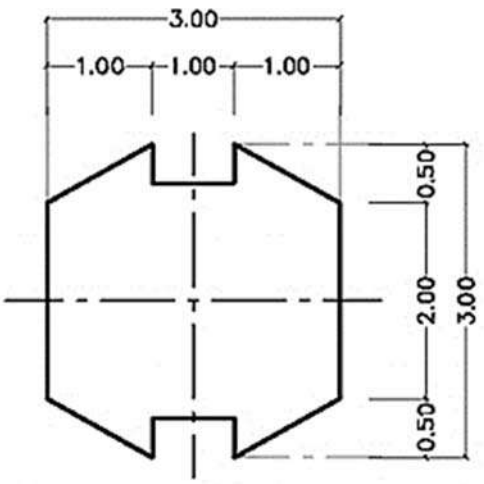


Figura 2. 8 Sección transversal tipo. (Carrión et al., 2005)

2.2.3 CABLES DE ACERO

En la tabla 2.1 (Carrión et al., 2005), se muestra el número de torones de acero en cada uno de los 112 cables.

Tabla 2.1 Número de torones por cable

Tirante	SEMI-ARPA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	23	22	22	23	23	22	22	23
2	16	14	14	16	16	14	14	16
3	18	18	18	18	18	18	18	18
4	19	19	19	19	19	19	19	19
5	21	21	21	21	21	21	21	21
6	22	22	22	22	22	22	22	22
7	23	24	24	23	23	24	24	23
8	25	25	25	25	25	25	25	25
9	26	26	26	26	26	26	26	26
10	27	27	27	27	27	27	27	27
11	28	28	28	28	28	28	28	28
12	29	28	28	29	29	28	28	29
13	28	28	28	28	28	28	28	28
14	32	30	30	32	37	37	30	32

Fuente: (Carrión et al., 2005)

La ubicación de los tirantes tomando en cuenta su punto de anclaje tanto en el tablero como en la pila, sus longitudes, y distancias entre puntos de anclaje se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Medidas y espaciamiento de los cables

Tirante	Distancia de anclajes en tablero (m)	Altura (m)	Longitud del tirante (m)	Distancia entre anclajes en torre (m)	Distancia entre anclajes en tablero (m)
1	7.25	16.89	18.38	16.89	7.25
2	14.41	19.99	24.64	3.1	7.16
3	21.53	22.25	30.96	2.26	7.12
4	28.63	24.3	37.55	2.05	7.1
5	35.72	26.25	44.33	1.95	7.09
6	42.8	28.16	51.23	1.91	7.08
7	49.87	30.04	58.22	1.88	7.07
8	56.93	31.9	65.26	1.86	7.06
9	63.99	33.75	72.34	1.85	7.06
10	71.04	35.59	79.46	1.84	7.05
11	78.09	37.42	86.59	1.83	7.05
12	85.13	39.25	93.74	1.83	7.04
13	92.17	41.07	100.91	1.82	7.04
14	99.21	42.9	108.09	1.83	7.04

Fuente: (Carrión et al., 2005)

Al existir un diferente número de torones por cable, el área de los mismos es ligeramente distinta como se muestra en tabla 2.3.

Tabla 2.3 Área de los cables

Tirante	ÁREA (m^2)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
4	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
5	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
6	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
7	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
9	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
10	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
11	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
12	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
13	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
14	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004

El área de cada torón es de 0.00013935 m^2. (Carrión et al., 2005)

Como el objetivo principal de este proyecto es estudiar la posibilidad de sustituir los cables de acero por cables de materiales compuestos, en las siguientes secciones se realizaron cambios en las propiedades de los cables, pasando de acero a cables de fibra de carbono y de acero a cables de basalto, para observa los cambios en el comportamiento dinámico y en la respuesta sísmica de los distintos puentes. La geometría y propiedades del resto de los elementos que conforman la estructura siguen siendo los mismos, así como las cargas aplicadas a ella.

2.2.4 CABLES DE FIBRAS DE CARBONO

En los últimos veinte años, las aplicaciones de materiales reforzados con fibras de carbono (figura 2.9) o FRP por sus siglas en inglés, se han desarrollado en gran medida dentro de la ingeniería civil (Wu & Wang, 2008). Además de la adaptación y refuerzo de estructuras existentes, los materiales FRP se han aplicado gradualmente en nuevas estructuras como tableros de puentes, elementos de concreto reforzado, etc., debido a sus propiedades mecánicas y químicas superiores, alta resistencia en proporción a su peso, propiedades anticorrosivas y resistencia a la fatiga, entre otros.

En estudios y experimentos previos con FRP en puentes atirantados (Wu & Wang, 2008), se han usado cables hechos de fibra de carbono para superar las deficiencias de los cables de acero debido a sus mejores propiedades mecánicas y químicas, superiores incluso a la fibra de vidrio o aramida. Sin embargo, el mayor costo de las fibras de carbono limitan su desarrollo y aplicaciones, sobretodo en estructuras a gran escala. A pesar de esto, el uso de materiales compuestos se extiende cada vez más en la construcción, gracias a las ventajas que estos proporcionan, ya sea por representar un costo menor, requerir de menos mantenimiento o mejorar el comportamiento de elementos a los cuales serán incorporados.

2.2.5 CABLES DE FIBRAS DE BASALTO

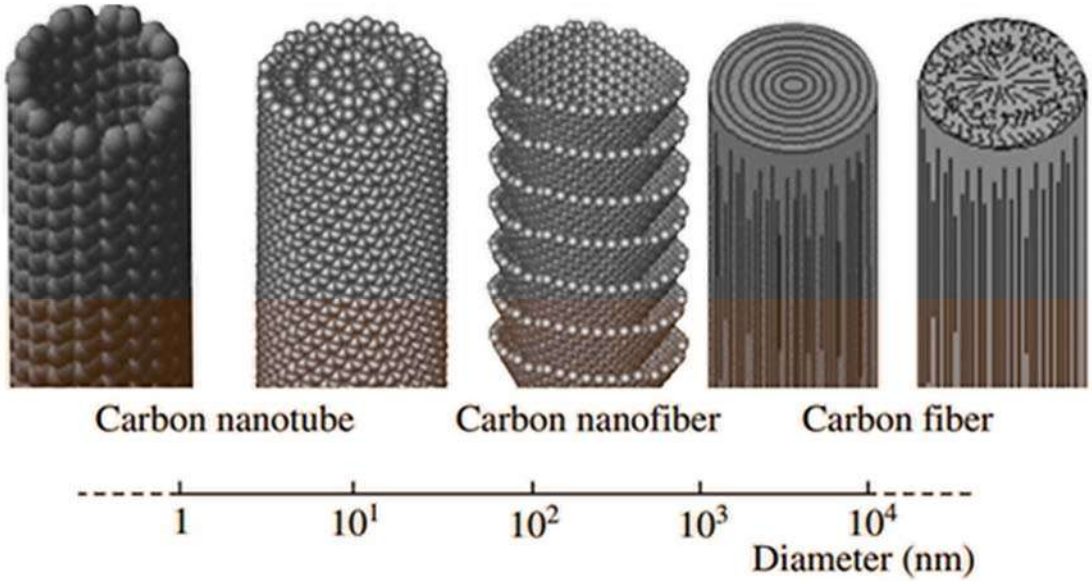


Figura 2. 9 Tipos de estructuras del carbono

Las fibras de basalto tienen especial ventaja cuando son usadas para cables de puentes. Aunque su resistencia a la tensión no es tan alta como las fibras de carbono, la gran deformación a la rotura que poseen, las hacen igual de viables para otras aplicaciones. Además, sus propiedades mecánicas y químicas superiores tales como la resistencia al agua, la sal, ácidos y álcalis, los protegen de la degradación ambiental. La capacidad para resistir la fatiga garantiza un buen comportamiento, además, trabaja con un amplio rango de temperaturas protegiendo los cables del fuego.

El costo significativamente menor de las fibras de basalto es casi de una décima parte en comparación a las fibras de carbono e igual o incluso menor a las fibras de vidrio, esto contribuye en gran medida a que su aplicación sea mayor en construcciones a gran escala. Por otro lado, su relativamente bajo módulo de elasticidad se traduce a una baja rigidez en comparación con el acero, lo cual puede evitarse aumentando el área de la sección o combinándolo con otras fibras (figura 2.10).

Los cables de fibra de basalto son utilizados para mejorar el rendimiento del puente debido a sus propiedades mecánicas y químicas, favorables en comparación con fibras de vidrio, y de bajo costo en comparación con las fibras de carbono. Las ventajas y desventajas de los cables con fibra de basalto son discutidas en términos de un estudio estático no lineal de un puente atirantado de 1, 088 metros de longitud mediante el método de elementos finitos (Wu & Wang, 2008).

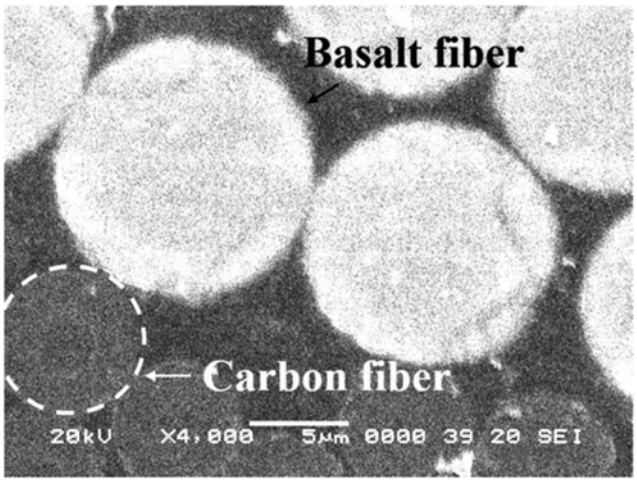


Figura 2. 10 Sección transversal de las fibras de basalto en comparación de las fibras de carbono

Para sustituir los cables de acero por cables de carbono o cables de basalto, se han propuesto dos criterios (Wang y Wu, 2009, Adanur, et al., 2013, entre otros). El primero consiste sustituir los cables de acero por cables de otro material, mediante la igualación de resistencia (figura 2.11a), para lo cual, se modifica el área transversal del cable del nuevo material, con lo que se obtiene un área transversal ligeramente más pequeña con respecto al área original de acero si el material de los nuevos cables es de fibra de carbono o de basalto, dada su mayor resistencia. De igual manera, al igualar las rigideces (figura 2.11b), se sustituye el módulo de elasticidad del acero y el del material por el cual se va a sustituir, dando por resultado un área transversal más grande en comparación al área de acero original en el caso de los cables de fibra de carbono. Las propiedades de los materiales usados se muestran en figura 2.12, a excepción de la fuerza de tensión última del acero, la que se usó es de 19 t/cm².

Resistencia equivalente:

$$[\sigma]_{CFRP}A_{CFRP} = [\sigma]_{ACERO}A_{ACERO} \quad \text{(a)}$$

Rigidez equivalente:

$$E_{CFRP}A_{CFRP} = E_{ACERO}A_{ACERO} \quad \text{(b)}$$

Donde: $[\sigma]_{CFRP}$ y $[\sigma]_{ACERO}$ es el esfuerzo de tensión última del CFRP y del acero respectivamente. E_{CFRP} y E_{ACERO} es el módulo de elasticidad del CFRP y del acero respectivamente. A_{CFRP} y A_{ACERO} es el área de sección transversal del CFRP y del acero respectivamente.

Figura 2. 11 Relación área-resistencia (a) y Relación área-rigidez (b). (Adanur, Günaydin, Altunışık, & Sevim, 2013)

Type of cable	Density (g/cm^3)	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at failure (%)
HS steel wire/strand	7.80	200	1770	>3.50
HS CFRP	1.60	230	3400	1.48
BFRP	2.65	91	2100	2.30
GFRP	2.60	80	1500	1.90
Hybrid B/CFRP 28%	2.36	130	1924	2.30
Hybrid B/CFRP 50%	2.13	161	2375	1.48

Note: HS represents high strength.

Figura 2. 12 Propiedades mecánicas de los materiales. (Wu & Wang, 2008)

En las tablas 2.4 a 2.7, se muestran las áreas de los cables después de haber realizado el cambio de sección transversal usando los criterios de igualación de resistencias e igualación de rigideces.

Tabla 2.4 Área de los cables de fibra de carbono cuando se iguala la resistencia de los cables

Tirante	ÁREA (m²)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
2	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
5	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
7	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
9	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
11	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
12	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
13	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
14	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002

Tabla 2.5 Área de los cables de fibra de carbono cuando se iguala la rigidez de los cables

Tirante	ÁREA (m²)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
5	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
6	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
7	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
9	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
10	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
11	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
12	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004
13	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
14	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004

Tabla 2.6 Área de los cables de fibra de basalto cuando se iguala la resistencia de los cables

Tirante	ÁREA (m2)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
5	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
6	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
7	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
9	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
10	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
11	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
12	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004
13	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
14	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004

Tabla 2.7 Área de los cables de fibra de basalto cuando se iguala la rigidez de los cables

Tirante	ÁREA (m2)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
2	0.005	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.005
3	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
5	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
6	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
7	0.007	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.007
8	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
9	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
10	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
11	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
12	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
13	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.010	0.009	0.009	0.010	0.012	0.012	0.009	0.010

2.3 MODELO NUMÉRICO EN SAP2000

El programa SAP2000 es ampliamente conocido en la ingeniería estructural. Este programa es capaz de modelar y analizar cualquier tipo de estructura, incluso permite diseñar elementos basados en los reglamentos más usados como AASHTO, ACI, RCDF, EUROCODIGO. Con este programa se pueden realizar cálculos estructurales en tres dimensiones mediante el método de los elementos finitos. Mediante el uso de este programa, se pueden modelar elementos de geometrías complejas, definir diversos estados de carga, definir materiales, asignar secciones y realizar análisis estructurales lineales y no lineales.

Al realizar el diseño y análisis de un puente atirantado es conveniente realizar la modelación del tablero con elementos Shell, lo cual consiste en dividir el tablero en secciones más pequeñas, lo que permite tener un análisis mucho más preciso.

2.3.1 MODELACIÓN DEL TABLERO

El tablero está conformado por 684 elementos Shell (figura 2.13) con áreas variables en función de la ubicación de los cables, de tal manera que las áreas están divididas de forma que las uniones coincidan con los anclajes de los cables. A su vez, los elementos Shell que representan la losa del tablero, están simplemente apoyados sobre los elementos Frame que componen el cuerpo del tablero.

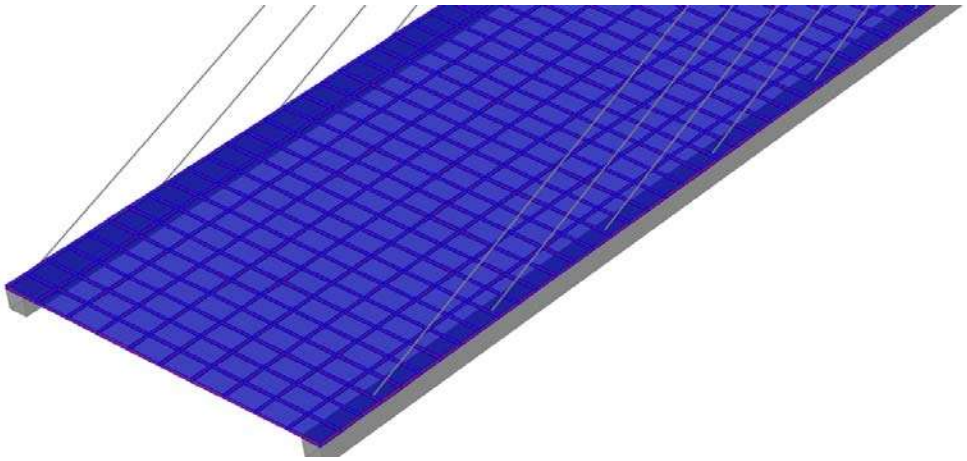


Figura 2. 13 Losa dividida y modelada mediante elementos Shell

Para este proyecto se definieron tres secciones que conforman el tablero:

Trabe longitudinales

Estas trabes se encuentran en los bordes exteriores del tablero (figura 2.14), y fueron divididas de tal manera que exista una conexión entre las trabes transversales y los anclajes de los cables, dando un total de 338 elementos.

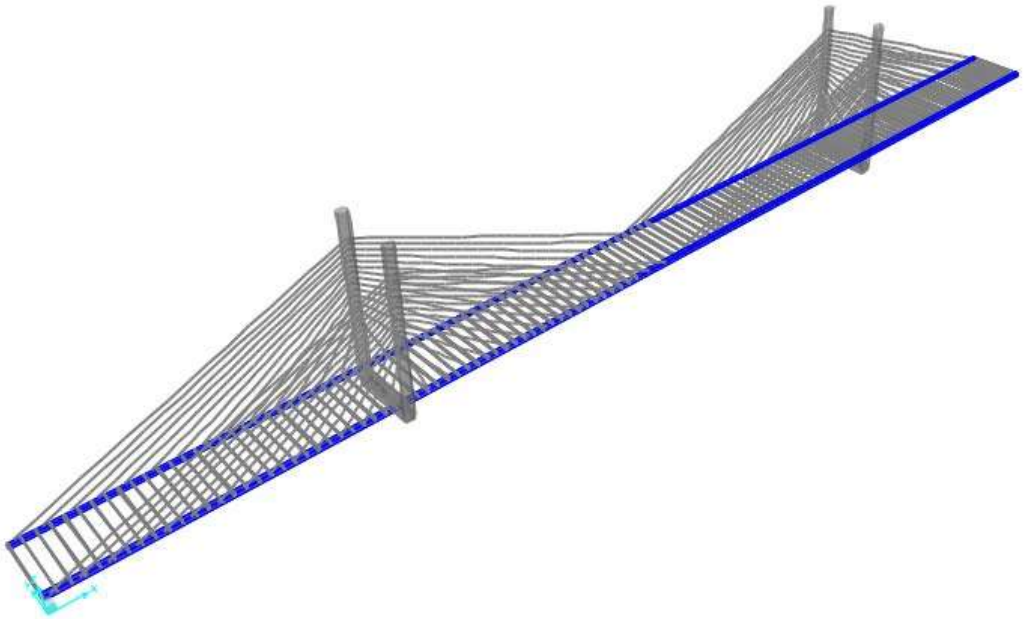


Figura 2. 14 Trabes longitudinales.

Trabes transversales

Con un total de 123 elementos, son perpendiculares a las trabes longitudinales (figura 2.15),

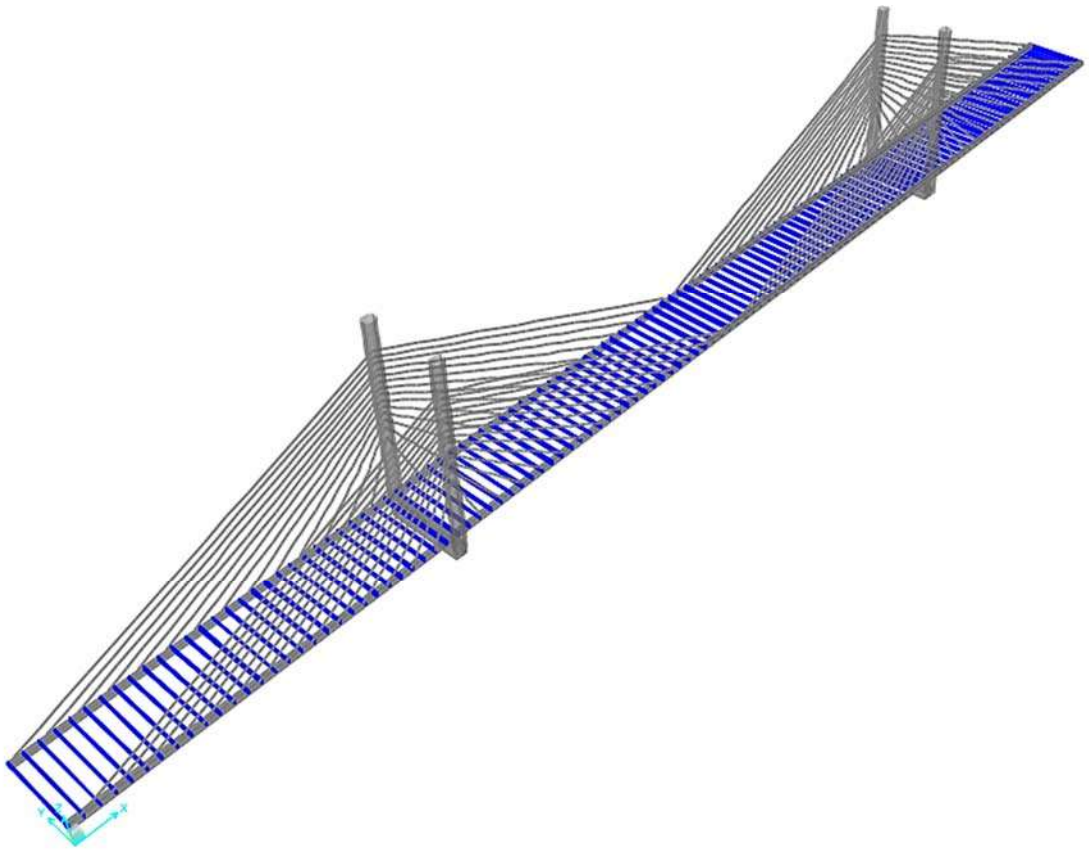


Figura 2. 15 Trabes transversales.

Losa

Con un peralte de 0.20 m que se extiende a lo largo del tablero con un espesor constante (figura 2.16). Como se mencionó anteriormente, la losa está conformada por elementos Shell, cuyo propósito es determinar de una manera más detallada el comportamiento del tablero bajo las cargas a las cuales será sometido.

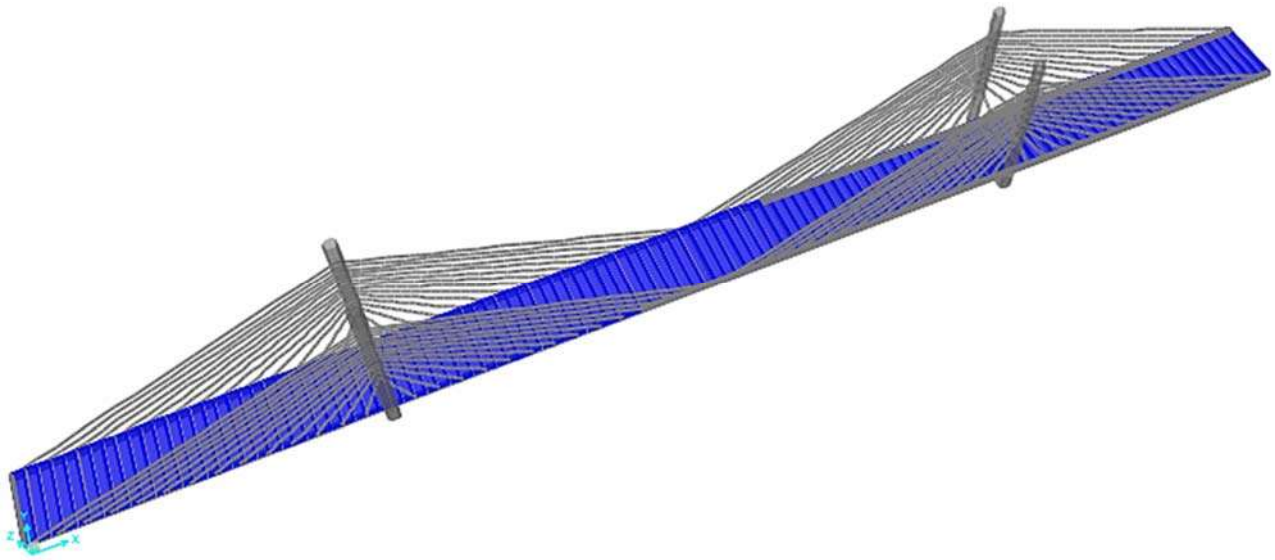


Figura 2. 16 Losa de tablero.

2.3.2 MODELACIÓN DE LA TORRE CON ELEMENTOS FRAME

Los elementos que conforman las torres se definieron como elementos frame. Las torres en forma de H (figura 2.17), tienen una altura de 58 m, dividida en dos tramos, uno de 6 m y otro de 52 m (figura 2.18). Para el análisis estructural se dividió la longitud total de las torres en segmentos de 4m cada uno, con el fin de obtener resultados más precisos.

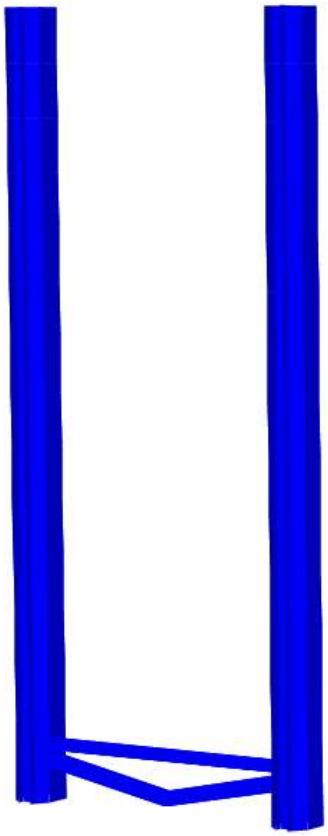


Figura 2. 17 Modelo de la torre con elementos frame

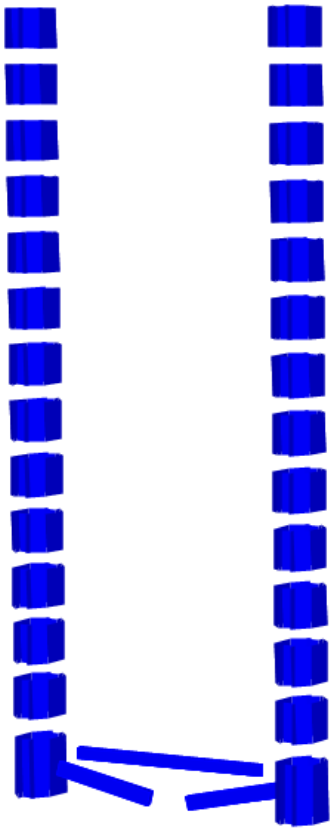


Figura 2. 18 Modelo de la torre dividida en segmentos

2.3.3 MODELACIÓN DE TIRANTES CON ELEMENTOS CABLE

Los tirantes están conformados por determinado número de torones, y cubiertos por una capa que los protege de agentes externos. En este caso, cada semi arpa está conformada por 14 elementos cables, dando un total de 112 tirantes, los cuales pueden ser modelados en SAP2000 de dos maneras, como elementos Frame o como elementos cable. El comportamiento real de los tirantes es altamente no lineal, su deflexión depende del esfuerzo en el material y de su cambio de geometría, motivo por el cual es conveniente modelarlos como elementos cable (figura 2.19). Las conexiones tirante-tablero y tirante-puente se hacen mediante anclajes.

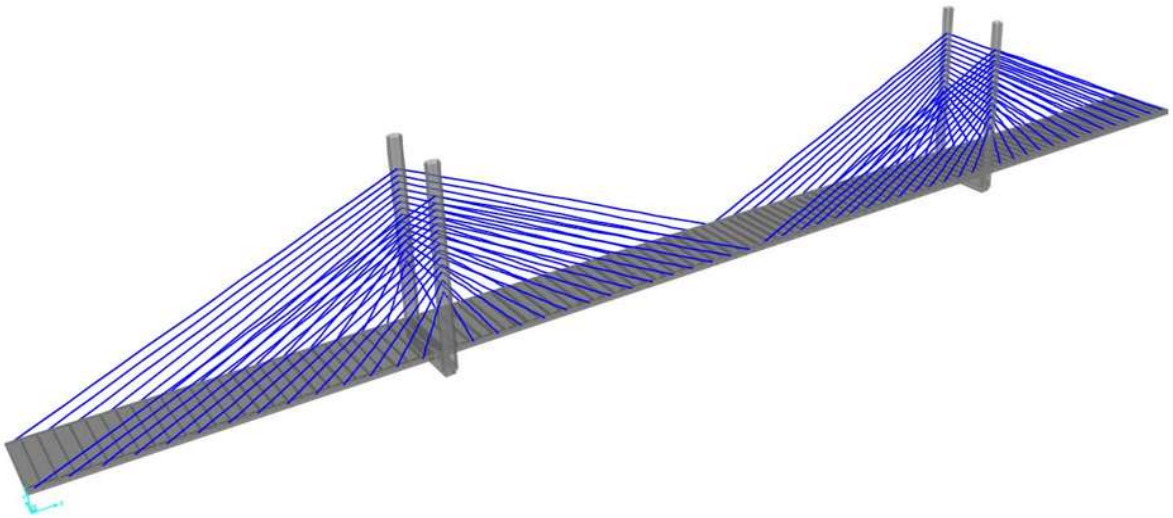


Figura 2.19 Modelo de tirantes en el puente

CAPÍTULO 3
ANÁLISIS MODAL

3.1 ANÁLISIS MODAL

El análisis modal se utiliza para determinar las frecuencias y los modos de vibración de una estructura. Estos modos son útiles para entender el comportamiento de la estructura, y como base para la superposición modal al emplear un espectro de respuesta o de diseño, así como en casos de análisis modal en la historia en el tiempo.

Existen diferentes “modos” o formas en los que una estructura puede vibrar u oscilar frente a una excitación sísmica determinada. Cada modo tiene, una deformada característica y una frecuencia de vibración asociada diferente.

En realidad, una estructura sometida a un sismo vibrará según una combinación de diferentes modos de vibración. El cálculo modal espectral o dinámico es el de uso más común y generalizado por las normas sismorresistentes. En esencia, intenta combinar estimaciones estadísticas-históricas de la acción sísmica, con la teoría de dinámica estructural. Todo el proceso se orienta a la obtención de la respuesta (desplazamientos y/o elementos mecánicos) del sistema estructural.

Como se mencionó anteriormente, para este proyecto se realizaron cinco modelos en SAP2000, que consisten en un puente atirantado con distintos tipos de cables. El puente prototipo tiene cables típicos de acero de alta resistencia que se usan en los puentes atirantados. Los otros cuatro modelos corresponden a cables de fibra de carbono y cables de fibra de basalto, con áreas derivadas de dos criterios distintos: a) a partir de la igualación de resistencias y b) mediante la igualación de rigideces. Inicialmente se determinaron las propiedades dinámicas de cinco puentes, considerando 100 modos de vibrar para obtener el mayor porcentaje de participación de masa de la estructura. Las propiedades dinámicas de los cinco puentes, se muestran a continuación.

3.1.1 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE ACERO

En la tabla 3.1 se muestran los periodos, frecuencias y factores de participación de modal de masa del puente con cables de acero de alta resistencia.

Tabla 3. 1 Tabla de modos de vibrar. Puente con cables de acero de alta resistencia

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (ciclos/s)	Longitudinal	Transversal	Vertical	Sumatoria Longitunidal	Sumatoria Transversal	Sumatoria Vertical	Giro Longitunidal	Giro Transversal	Giro Vertical	Sumatoria de Giro Longitunidal	Sumatoria de Giro Transversal	Sumatoria de Giro Vertical
1	1.75133	0.57100	2.79E-07	5.69E-06	1.51E-01	2.789E-07	0.00001	0.15069	3.7E-07	5.8E-08	3.05E-09	3.69E-07	5.78E-08	3.05E-09
2	1.66943	0.59901	4.03E-09	5.89E-01	1.47E-06	2.83E-07	0.58902	0.15070	9.7E-02	6.6E-10	1.75E-08	0.09682	5.85E-08	2.06E-08
3	1.31566	0.76007	3.29E-12	9.79E-08	1.11E-11	2.83E-07	0.58902	0.15070	3.3E-07	1.5E-10	1.49E-01	0.09682	5.86E-08	0.14913
4	1.30441	0.76663	2.03E-07	1.78E-07	2.01E-07	4.854E-07	0.58902	0.15070	7.1E-07	2.4E-07	6.00E-05	0.09683	2.96E-07	0.14919
5	1.30410	0.76681	2.11E-07	1.84E-12	2.09E-07	6.961E-07	0.58902	0.15070	3.2E-13	2.3E-07	2.62E-10	0.09683	5.30E-07	0.14919
6	1.28879	0.77592	5.49E-03	6.65E-08	1.74E-06	0.00549	0.58902	0.15070	6.5E-07	4.0E-05	1.29E-08	0.09683	4.10E-05	0.14919
7	1.16303	0.85982	1.15E-10	1.19E-02	2.60E-08	0.00549	0.60092	0.15070	5.4E-01	9.3E-10	8.25E-08	0.64096	4.10E-05	0.14919
8	1.10922	0.90153	2.40E-08	4.97E-07	7.78E-04	0.00549	0.60092	0.15148	1.0E-06	5.1E-07	2.98E-08	0.64096	4.10E-05	0.14919
9	0.93982	1.06403	2.83E-03	9.80E-10	7.71E-07	0.00832	0.60092	0.15148	5.9E-08	2.7E-01	7.26E-10	0.64096	0.26874	0.14919
10	0.93094	1.07418	6.41E-10	1.86E-09	2.57E-01	0.00832	0.60092	0.40862	2.0E-07	7.2E-07	1.94E-09	0.64096	0.26874	0.14919
11	0.89072	1.12269	8.79E-08	2.78E-06	2.70E-06	0.00832	0.60092	0.40862	1.9E-02	2.3E-07	6.42E-06	0.66028	0.26874	0.14919
12	0.88742	1.12686	2.24E-07	3.33E-08	5.97E-06	0.00832	0.60092	0.40863	1.2E-03	4.4E-07	9.30E-05	0.66153	0.26874	0.14928
13	0.80715	1.23892	1.45E-04	6.23E-10	9.29E-08	0.00847	0.60092	0.40863	4.0E-08	6.4E-02	3.31E-11	0.66153	0.33305	0.14928
14	0.76088	1.31427	2.90E-07	1.90E-08	6.60E-02	0.00847	0.60092	0.47463	6.0E-07	1.5E-07	6.07E-09	0.66153	0.33305	0.14928
15	0.63306	1.57964	2.95E-04	1.02E-09	1.21E-06	0.00877	0.60092	0.47463	1.2E-07	1.9E-02	2.09E-08	0.66153	0.35254	0.14928
16	0.63255	1.58091	3.00E-09	1.59E-09	3.87E-02	0.00877	0.60092	0.51332	1.9E-07	2.3E-07	1.63E-08	0.66153	0.35254	0.14928
17	0.62825	1.59171	1.00E-07	3.62E-07	1.97E-10	0.00877	0.60092	0.51332	1.4E-04	2.3E-08	4.93E-03	0.66167	0.35254	0.15421
18	0.62785	1.59273	7.67E-08	1.62E-04	6.96E-10	0.00877	0.60108	0.51332	7.1E-02	6.5E-09	9.13E-06	0.73279	0.35254	0.15422
19	0.61240	1.63293	9.33E-04	6.06E-10	2.75E-08	0.00970	0.60108	0.51332	8.7E-09	4.4E-02	4.48E-10	0.73279	0.39631	0.15422
20	0.59198	1.68926	7.69E-07	1.15E-08	4.79E-02	0.00970	0.60108	0.56119	5.9E-11	2.8E-07	3.79E-09	0.73279	0.39631	0.15422
21	0.53476	1.87000	5.26E-06	3.00E-03	7.20E-07	0.00970	0.60408	0.56119	1.4E-02	4.0E-06	9.20E-05	0.74705	0.39631	0.15431
22	0.53395	1.87283	4.87E-06	1.30E-05	6.85E-07	0.00971	0.60410	0.56119	6.4E-05	5.1E-06	2.05E-02	0.74711	0.39632	0.17486
23	0.53099	1.88327	1.41E-03	2.35E-07	1.86E-07	0.01111	0.60410	0.56119	1.3E-06	3.6E-02	1.96E-06	0.74711	0.43221	0.17486
24	0.51965	1.92437	8.33E-06	2.00E-08	2.21E-02	0.01112	0.60410	0.58329	2.3E-07	1.2E-07	2.59E-07	0.74711	0.43221	0.17487
25	0.48611	2.05717	2.12E-01	7.71E-08	6.11E-06	0.22342	0.60410	0.58330	3.3E-07	3.9E-03	2.75E-08	0.74711	0.43610	0.17487
								⋮						
99	0.18810	5.31641	1.17E-08	3.61E-09	2.40E-05	0.72919	0.73896	0.66722	2.6E-09	1.2E-06	2.83E-09	0.79563	0.64156	0.51486
100	0.18589	5.37957	5.23E-07	4.98E-09	3.48E-08	0.72919	0.73896	0.66722	8.2E-10	1.5E-03	3.20E-09	0.79563	0.64304	0.51486

A pesar de que se consideraron 100 modos de vibrar, los porcentajes acumulados de participación de masa del puente con cables de acero, están comprendidos entre el 80% para el giro alrededor del eje longitudinal y el 51% para el giro alrededor del eje vertical.

El primer modo global de la estructura tiene un periodo de 1.75 s y corresponde al primer modo vertical del tablero, con una participación de masa moderada del 15%. El segundo modo del puente es el primer modo transversal con una participación de masa importante del 59%. El tercer modo global presenta el primer modo rotacional alrededor del eje vertical, con un periodo de 1.32 s y un porcentaje de participación de masa del 15%. Las configuraciones modales de los tres modos descritos se presentan en las figuras 3.1 a 3.3.

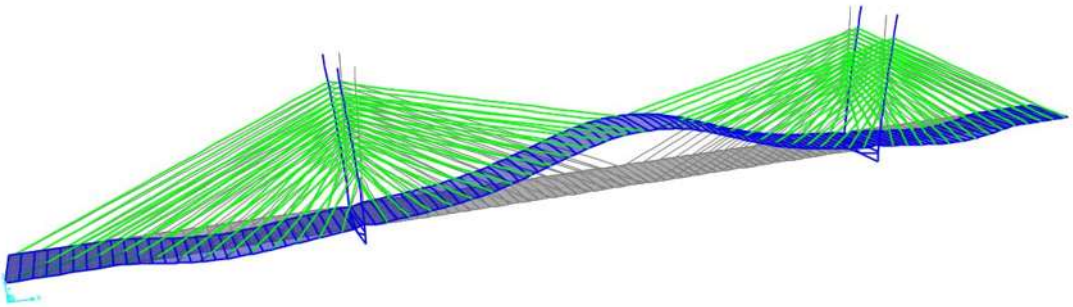


Figura 3.1 Modo 1 global de la estructura y primer modo vertical.
T= 1.75s, f= 0.57 ciclos/s

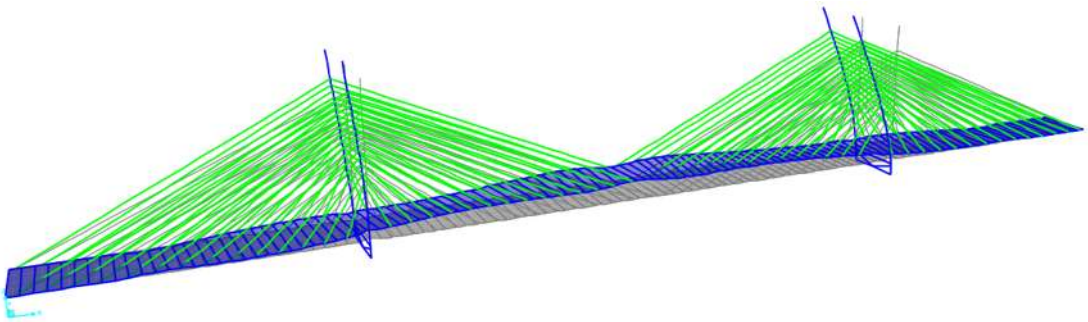


Figura 3.2 Modo 2 global de la estructura y primer modo transversal.
T= 1.67s, f= 0.60 ciclos/s

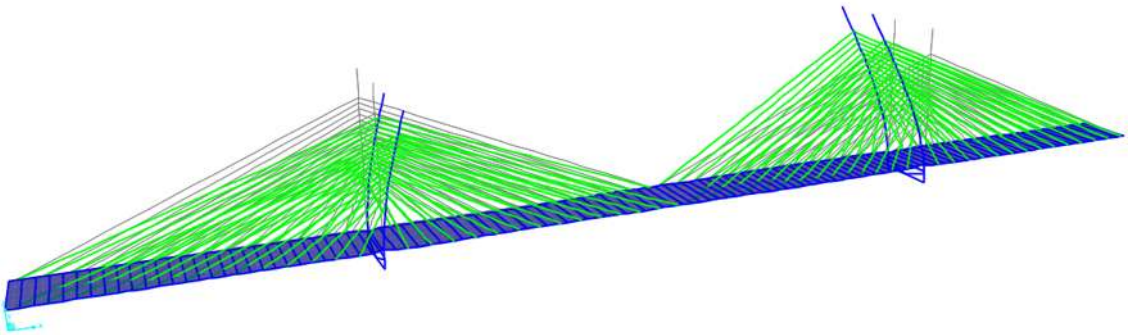


Figura 3.3 Modo 3 global de la estructura y primer modo rotacional alrededor del eje vertical.
T= 1.32s, f= 0.76 ciclos/s

El primer modo de rotación alrededor del eje longitudinal corresponde al séptimo modo global del sistema, con un periodo de 1.16 s y un elevado porcentaje de participación de masa del 64%. El noveno modo del puente es el primer modo de rotación alrededor del eje transversal, con una participación de masa del 27%. La vibración del puente en dirección longitudinal se manifiesta hasta el modo número 25 debido a la restricción que ofrecen los apoyos del estribo 1 en esta dirección. El periodo en el modo 25 es de 0.49 s y el porcentaje de participación de masa en dirección longitudinal es de 22%. Las configuraciones modales se muestran en las figuras 3.4 a 3.6.

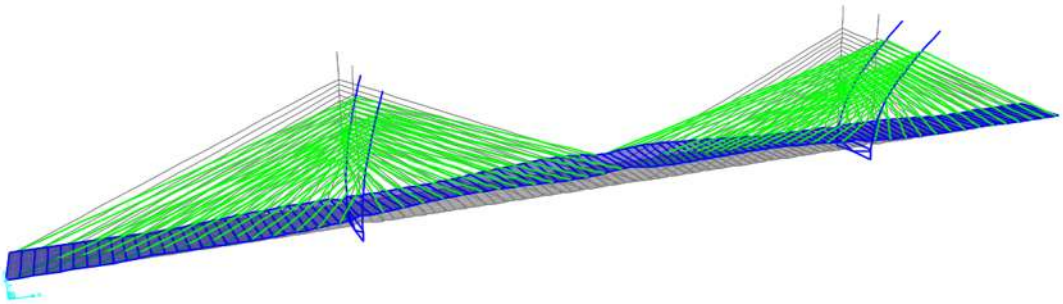


Figura 3.4 Modo 7 global de la estructura y primer modo rotacional alrededor del eje longitudinal. T= 1.16 s, f= 0.86 ciclos/s

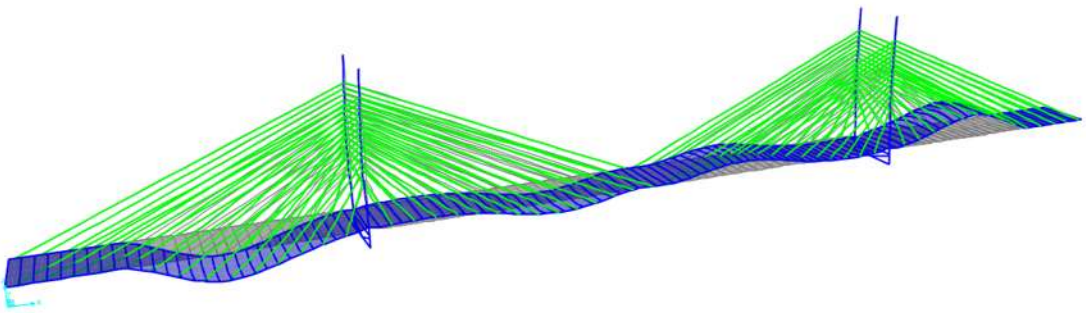


Figura 3.5 Modo 9 global de la estructura y primer modo rotacional alrededor del eje transversal. T= 0.94s, f= 1.06 ciclos/s

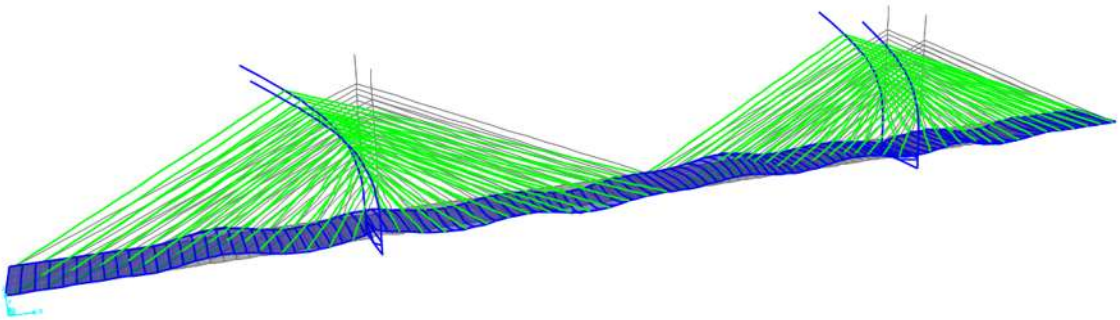


Figura 3.6 Modo 25 global de la estructura y primer modo longitudinal.
T= 0.49s, f= 2.06 ciclos/s

Además de los primeros modos en los seis grados de libertad principales del puente, destaca el segundo modo en dirección vertical que corresponde al décimo modo global de la estructura (figura 3.7). El periodo del modo 10 es de 0.94 s con un factor de participación modal acumulada de 41%.

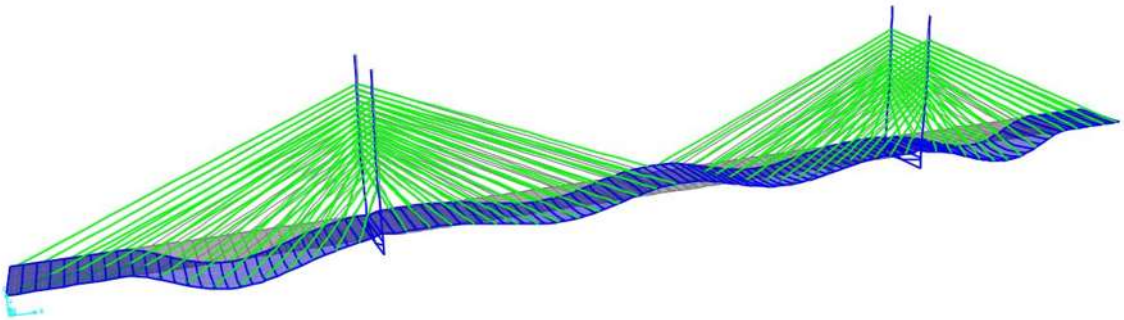


Figura 3.7 Modo 10 global de la estructura y segundo modo en dirección vertical.
T= 0.93s, f= 1.07 ciclos/s

3.1.2 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE CARBONO (=R)

Al sustituir los cables de acero por cables de fibra de carbono, considerando la misma resistencia para los dos tipos de cable, se obtuvieron áreas más pequeñas con la fibra de carbono debido al mayor esfuerzo que puede aplicarse a este mismo material. La resistencia de las fibras de carbono es 1.8 veces la del acero de alta resistencia, como se aprecia en la tabla 3.2. En la tabla 3.3 se muestran los periodos, frecuencias y factores de participación modal de masa del puente con cables de fibra de carbón al igualar las resistencias.

Tabla 3. 2 Resistencia de los materiales

Material	Resistencia (t/cm²)
Acero de Alta Resistencia	19
Fibras de Carbono	34.7

Tabla 3. 3 Tabla de modos de vibrar. Puente con cables de fibra de carbono (=R)

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (ciclos/s)	Longitudinal	Transversal	Vertical	Sumatoria Longitunidal	Sumatoria Transversal	Sumatoria Vertical	Giro Longitunidal	Giro Transversal	Giro Vertical	Sumatoria de Giro Longitunidal	Sumatoria de Giro Transversal	Sumatoria de Giro Vertical
1	1.97206	0.50708	4.82E-07	6.80E-07	1.62E-01	4.82E-07	6.80E-07	0.16249	2.7E-12	7.6E-08	4.86E-09	2.75E-12	7.56E-08	4.86E-09
2	1.65852	0.60295	1.58E-08	5.88E-01	2.25E-07	4.98E-07	0.58831	0.16249	9.1E-02	1.0E-09	8.22E-10	0.09057	7.66E-08	5.68E-09
3	1.42428	0.70211	5.91E-03	3.99E-07	3.14E-06	0.00591	0.58831	0.16249	5.9E-07	8.7E-04	3.71E-09	0.09057	0.00087	9.39E-09
4	1.29924	0.76968	1.27E-12	1.72E-09	2.48E-10	0.00591	0.58831	0.16249	9.1E-09	7.1E-11	1.47E-01	0.09057	0.00087	0.14653
5	1.28797	0.77642	2.88E-08	3.91E-09	5.16E-07	0.00591	0.58831	0.16249	2.0E-08	4.2E-07	1.32E-06	0.09057	0.00087	0.14653
6	1.28792	0.77644	2.79E-08	5.36E-12	5.22E-07	0.00591	0.58831	0.16249	8.1E-12	4.1E-07	1.03E-09	0.09057	0.00087	0.14653
7	1.23709	0.80835	1.59E-07	2.76E-07	5.83E-03	0.00591	0.58831	0.16832	8.3E-06	3.3E-06	7.50E-08	0.09058	0.00088	0.14653
8	1.15309	0.86724	4.53E-09	1.03E-02	2.49E-08	0.00591	0.59859	0.16832	5.5E-01	4.5E-08	4.39E-09	0.64351	0.00088	0.14653
9	1.04934	0.95298	3.64E-03	3.08E-08	2.40E-07	0.00956	0.59859	0.16832	9.1E-08	2.9E-01	6.49E-09	0.64351	0.28644	0.14653
10	1.04271	0.95904	6.78E-10	1.84E-10	2.62E-01	0.00956	0.59859	0.42996	1.2E-10	1.3E-07	3.32E-11	0.64351	0.28644	0.14653
11	0.98118	1.01918	1.79E-07	2.04E-04	2.32E-07	0.00956	0.59880	0.42996	1.9E-02	2.0E-06	1.30E-05	0.66210	0.28644	0.14655
12	0.97693	1.02361	5.18E-07	1.20E-05	6.85E-07	0.00956	0.59881	0.42996	1.4E-03	4.4E-06	1.62E-04	0.66348	0.28644	0.14671
13	0.89342	1.11930	1.10E-05	3.86E-11	7.85E-09	0.00957	0.59881	0.42996	1.1E-08	6.6E-02	5.28E-13	0.66348	0.35207	0.14671
14	0.84073	1.18944	4.79E-07	1.29E-08	7.29E-02	0.00957	0.59881	0.50284	1.0E-06	1.2E-07	5.55E-09	0.66348	0.35207	0.14671
15	0.70576	1.41691	4.85E-07	1.18E-04	3.18E-07	0.00957	0.59893	0.50284	6.6E-02	3.9E-08	3.15E-04	0.72919	0.35207	0.14702
16	0.70536	1.41771	2.75E-06	1.50E-05	1.63E-06	0.00957	0.59894	0.50284	9.0E-03	2.7E-07	2.28E-03	0.73816	0.35207	0.14930
17	0.69291	1.44319	1.02E-03	7.30E-13	2.25E-06	0.01059	0.59894	0.50284	4.4E-07	1.8E-02	1.86E-08	0.73816	0.37020	0.14930
18	0.69125	1.44666	5.06E-08	3.05E-11	2.97E-02	0.01059	0.59894	0.53259	5.4E-07	8.8E-07	1.81E-08	0.73816	0.37020	0.14930
19	0.65243	1.53273	1.34E-03	1.49E-09	1.46E-08	0.01194	0.59894	0.53259	1.5E-08	3.1E-02	3.91E-11	0.73816	0.40095	0.14930
20	0.62758	1.59343	4.31E-06	1.32E-08	3.50E-02	0.01194	0.59894	0.56758	9.8E-09	5.8E-07	2.90E-09	0.73816	0.40095	0.14930
21	0.59095	1.69219	1.40E-05	1.97E-03	2.03E-07	0.01195	0.60091	0.56758	1.3E-02	9.6E-07	1.38E-07	0.75155	0.40095	0.14930
22	0.58796	1.70079	9.50E-06	2.17E-08	1.06E-07	0.01196	0.60091	0.56758	3.0E-07	6.7E-07	5.53E-03	0.75156	0.40095	0.15484
23	0.57311	1.74488	1.68E-01	1.08E-07	4.60E-05	0.18023	0.60091	0.56763	2.7E-06	1.5E-02	5.64E-08	0.75156	0.41617	0.15484
24	0.55808	1.79187	9.84E-04	1.73E-06	3.89E-03	0.18121	0.60092	0.57152	3.8E-06	4.6E-04	3.23E-06	0.75156	0.41663	0.15484
25	0.55260	1.80962	1.67E-02	2.70E-07	1.30E-05	0.19792	0.60092	0.57153	3.5E-07	2.2E-02	5.92E-07	0.75156	0.43839	0.15484
								⋮						
99	0.18820	5.31364	1.25E-09	5.24E-09	8.20E-05	0.72599	0.73743	0.66696	1.0E-09	1.8E-07	3.27E-09	0.7944	0.64151	0.51282
100	0.18673	5.35528	7.91E-07	3.27E-09	5.40E-07	0.72599	0.73743	0.66696	6.6E-10	1.8E-03	2.27E-09	0.7944	0.64329	0.51282

Cables de fibra de carbono de igual resistencia que los cables de acero

Las diferencias que se observan en cuanto a las propiedades dinámicas del puente son de poca magnitud. Por ejemplo, el primer modo del puente tiene un periodo de 1.98 s, que es 13% mayor que en el puente con cables de acero. La participación de masa de ambos puentes es prácticamente la misma, así como la configuración del primer modo, la cual se muestra en la figura 3.8.

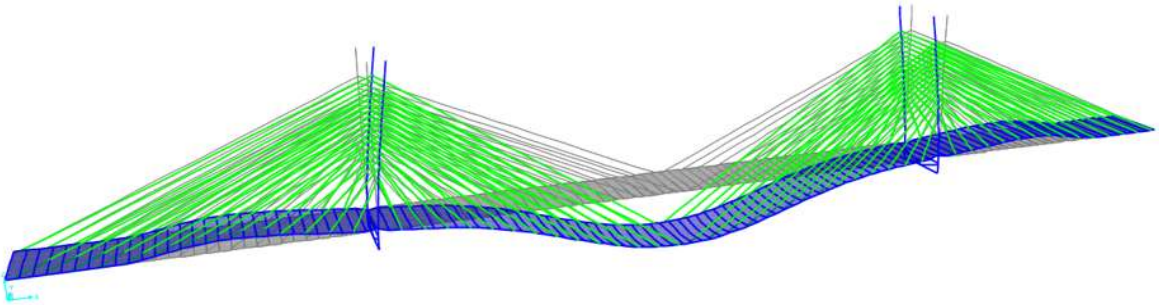


Figura 3.8 Modo 1 global de la estructura y primer modo vertical del puente. T= 1.97s, f= .51 ciclos/s

Otros modos que sufren cambios menores son el primer modo longitudinal (modo 23), que tiene un periodo 16% mayor con respecto a los cables de acero, y los modos de rotación (modo 9) alrededor del eje transversal y segundo modo vertical (modo 10), con periodos 11% más grandes que al usar los cables de acero. En la figura 3.9 se muestra la variación del periodo para los primeros dos modos de vibrar en las direcciones principales del puente, es decir, desplazamientos longitudinales, transversales y verticales, y los giros alrededor de los ejes longitudinal, transversal y vertical. Se observa que el puente con cables de carbono tiene periodos ligeramente mayores que cuando se colocan cables de acero.

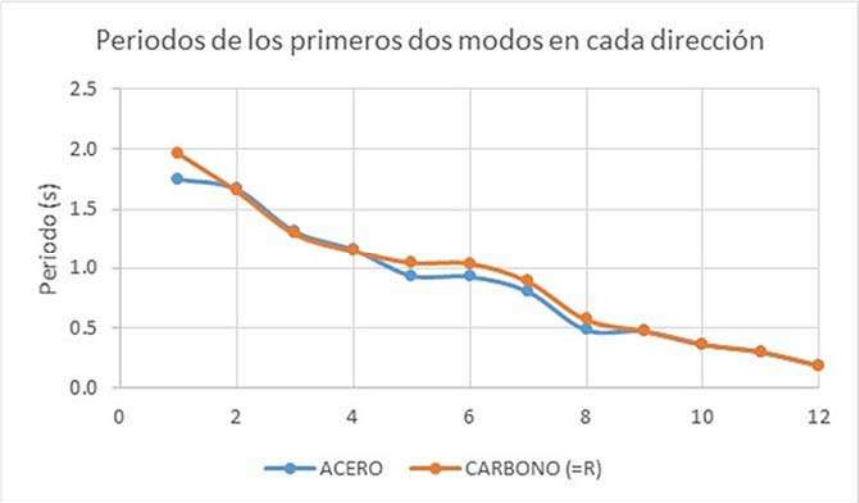


Figura 3.9 Periodos para los primeros modos de cada dirección cuando se usan cables de fibra de carbono y cables de acero de alta resistencia

Al considerar 100 modos de vibrar, se alcanzaron porcentajes acumulados de participación de masa en el puente con cables de fibra de carbono comprendidos entre el 79% para el giro alrededor del eje longitudinal y el 51% para el giro alrededor del eje vertical.

3.1.3 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE CARBONO (=K)

Al igualar las rigideces del puente con cables de acero y del puente con cables de fibra de carbono, las propiedades dinámicas no se alteran, aunque las secciones transversales de los cables resultan ligeramente más grandes pues el módulo de elasticidad de las fibras de carbono es 1.12 veces el del acero de alta resistencia, como se aprecia en la tabla 3.4. En la tabla 3.5 se muestran los periodos, frecuencias y factores de participación modal de masa del puente con cables de fibra de carbón al igualar la rigidez de ambos sistemas.

Tabla 3. 4 Módulo de Elasticidad de los materiales

Material	Módulo de Elasticidad (t/m²)
Acero de Alta Resistencia	21000000
Fibras de Carbono	23453473

Tabla 3. 5 Tabla de modos de vibrar. Puente con cables de fibra de carbono (=K)

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (ciclos/s)	Longitudinal	Transversal	Vertical	Sumatoria Longitunidal	Sumatoria Transversal	Sumatoria Vertical	Giro Longitunidal	Giro Transversal	Giro Vertical	Sumatoria de Giro Longitunidal	Sumatoria de Giro Transversal	Sumatoria de Giro Vertical
1	1.73396	0.57672	8.11E-08	2.24E-07	1.54E-01	8.114E-08	2.24E-07	0.15389	1.98E-08	7.97E-09	2.43E-10	1.977E-08	7.97E-09	2.43E-10
2	1.65830	0.60303	1.54E-08	5.88E-01	5.09E-08	9.657E-08	0.58844	0.15389	9.26E-02	2.04E-09	3.06E-09	0.09263	1.00E-08	3.30E-09
3	1.30236	0.76784	4.51E-03	2.31E-07	1.92E-08	0.00451	0.58844	0.15389	1.51E-06	9.80E-05	2.53E-07	0.09264	9.80E-05	2.56E-07
4	1.30082	0.76875	1.16E-08	1.48E-08	4.27E-14	0.00451	0.58844	0.15389	6.19E-08	4.85E-10	1.47E-01	0.09264	9.80E-05	0.14676
5	1.28960	0.77544	5.45E-09	3.05E-08	2.25E-07	0.00451	0.58844	0.15389	1.34E-07	2.35E-07	1.00E-05	0.09264	9.90E-05	0.14677
6	1.28947	0.77551	5.06E-09	1.37E-11	2.24E-07	0.00451	0.58844	0.15389	1.95E-11	2.34E-07	1.08E-09	0.09264	9.90E-05	0.14677
7	1.15364	0.86682	6.76E-10	1.07E-02	1.03E-08	0.00451	0.59917	0.15389	5.47E-01	8.23E-09	1.78E-08	0.63965	9.90E-05	0.14677
8	1.10996	0.90093	9.20E-08	6.35E-07	1.61E-03	0.00451	0.59917	0.15550	2.27E-06	1.09E-06	3.27E-08	0.63966	1.00E-04	0.14677
9	0.94937	1.05333	2.84E-03	5.60E-09	3.04E-06	0.00735	0.59917	0.15550	3.19E-07	2.69E-01	4.79E-09	0.63966	0.26929	0.14677
10	0.94255	1.06095	1.11E-09	2.09E-10	2.54E-01	0.00735	0.59917	0.40985	2.94E-08	2.44E-06	6.98E-10	0.63966	0.26930	0.14677
11	0.89411	1.11843	4.07E-07	1.34E-06	1.53E-07	0.00735	0.59917	0.40985	1.96E-02	6.28E-07	1.30E-05	0.65930	0.26930	0.14679
12	0.89000	1.12359	2.28E-06	1.86E-09	6.40E-07	0.00736	0.59917	0.40985	3.30E-03	2.36E-06	6.60E-05	0.66261	0.26930	0.14685
13	0.81832	1.22202	1.58E-04	3.04E-09	9.82E-08	0.00752	0.59917	0.40985	3.02E-07	6.91E-02	3.66E-10	0.66261	0.33835	0.14685
14	0.77385	1.29224	1.69E-07	1.77E-08	7.28E-02	0.00752	0.59917	0.48263	6.14E-07	1.62E-07	5.30E-09	0.66261	0.33835	0.14685
15	0.63594	1.57247	3.01E-04	1.93E-08	2.34E-06	0.00782	0.59917	0.48263	5.71E-06	5.52E-03	8.18E-07	0.66261	0.34387	0.14685
16	0.63535	1.57394	1.43E-08	2.36E-08	2.02E-02	0.00782	0.59917	0.50280	7.62E-06	2.49E-07	9.57E-07	0.66262	0.34387	0.14685
17	0.63413	1.57695	4.50E-07	2.10E-06	2.67E-06	0.00782	0.59917	0.50280	9.17E-04	3.93E-07	4.63E-03	0.66354	0.34387	0.15148
18	0.63364	1.57819	7.31E-07	1.39E-04	2.25E-06	0.00782	0.59931	0.50280	6.92E-02	2.23E-07	5.80E-05	0.73271	0.34387	0.15154
19	0.61247	1.63274	1.26E-03	3.80E-09	1.31E-08	0.00907	0.59931	0.50280	6.07E-08	4.16E-02	9.18E-10	0.73271	0.38549	0.15154
20	0.58766	1.70165	5.45E-07	1.63E-08	4.90E-02	0.00907	0.59931	0.55180	7.50E-09	2.50E-07	7.36E-09	0.73271	0.38549	0.15154
21	0.54071	1.84941	9.85E-06	2.77E-03	9.05E-07	0.00908	0.60208	0.55180	1.49E-02	2.02E-06	1.64E-04	0.74764	0.38549	0.15171
22	0.53973	1.85279	1.30E-05	2.60E-05	1.00E-06	0.00910	0.60210	0.55180	1.48E-04	2.76E-06	1.66E-02	0.74779	0.38550	0.16834
23	0.52756	1.89551	1.11E-03	3.47E-08	5.87E-07	0.01021	0.60210	0.55180	3.79E-07	4.88E-02	3.56E-07	0.74779	0.43432	0.16834
24	0.51744	1.93261	7.08E-06	3.34E-09	3.39E-02	0.01022	0.60210	0.58574	1.19E-07	3.37E-07	7.39E-08	0.74779	0.43432	0.16834
25	0.47972	2.08454	2.08E-01	6.43E-07	3.50E-05	0.21839	0.60210	0.58578	1.82E-06	2.59E-03	1.70E-05	0.74779	0.43691	0.16836
								⋮						
99	0.18802	5.31846	1.05E-09	5.13E-09	1.30E-05	0.72798	0.73776	0.66842	9.17E-10	9.14E-07	2.77E-09	0.79551	0.64251	0.51323
100	0.18569	5.38523	1.64E-07	5.17E-09	1.66E-09	0.72798	0.73776	0.66842	9.94E-10	1.59E-03	3.51E-09	0.79551	0.64410	0.51323

Cables de fibra de carbono de igual rigidez que los cables de acero

Las diferencias que se observan en cuanto a las propiedades dinámicas del puente son de poca magnitud. Por ejemplo, el primer modo del puente tiene un periodo de 1.73 s, que es 1% menor que el puente con cables de acero de alta resistencia. La participación de masa del puente con cables de acero de alta resistencia es prácticamente los mismos tal como se muestra en la figura 3.10.

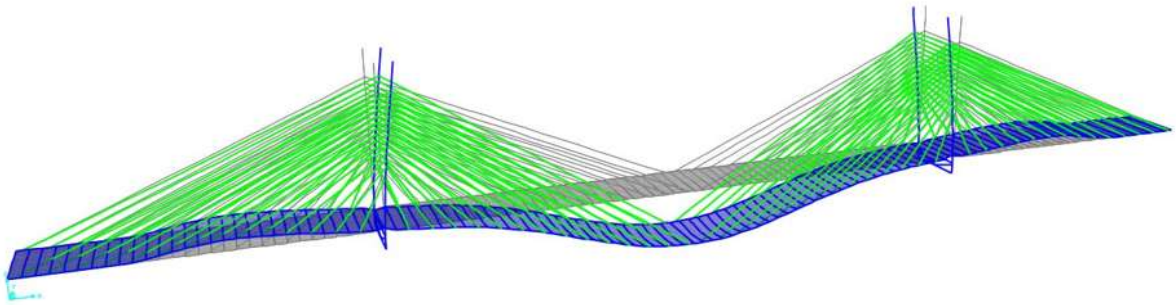


Figura 3. 10 Modo 1 global de la estructura y primer modo vertical del puente. T= 1.74s, f= .58 ciclos/s

Otros modos que sufren cambios menores son el primer modo longitudinal, que se presenta en el modo 23 global de la estructura, así como el primer modo rotacional alrededor del eje longitudinal. Al considerar 100 modos de vibrar, se alcanzaron porcentajes acumulados de participación de masa en el puente con cables de fibra de carbono comprendidos entre el 79% para el giro alrededor del eje longitudinal y el 51% para el giro alrededor del eje vertical.

3.1.4 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE BASALTO (=R)

Al sustituir los cables de acero por cables de fibra de basalto, igualando la resistencia para los dos tipos de cable, se obtuvieron áreas más pequeñas con la fibra de basalto debido al mayor esfuerzo que puede aplicarse a este material. La resistencia de las fibras de basalto es 1.13 veces la del acero de alta resistencia, como se aprecia en la tabla 3.6. En la tabla 3.7 se muestran los periodos, frecuencias y factores de participación modal de masa del puente con cables de fibra de basalto al igualar la resistencia de ambos sistemas.

Tabla 3. 2 Resistencia de los materiales

Material	Resistencia (t/cm^2)
Acero de Alta Resistencia	19
Fibras de Basalto	21.41

Tabla 3. 3 Tabla de modos de vibrar. Puente con cables de fibra de carbono (=R)

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (ciclos/s)	Longitudinal	Transversal	Vertical	Sumatoria Longitunidal	Sumatoria Transversal	Sumatoria Vertical	Giro Longitunidal	Giro Transversal	Giro Vertical	Sumatoria de Giro Longitunidal	Sumatoria de Giro Transversal	Sumatoria de Giro Vertical
1	2.10140	0.47587	8.06E-11	1.73E-08	1.78E-01	8.06E-11	1.725E-08	0.17842	3.05E-10	2.54E-10	3.85E-11	3.05E-10	2.54E-10	3.85E-11
2	1.66207	0.60166	5.87E-08	5.88E-01	8.78E-09	5.87E-08	0.58832	0.17842	9.00E-02	2.10E-09	7.05E-09	0.09001	2.35E-09	7.09E-09
3	1.55600	0.64267	4.58E-03	2.28E-06	1.49E-07	0.00458	0.58832	0.17843	1.04E-06	5.93E-03	6.70E-09	0.09001	0.00593	1.38E-08
4	1.35900	0.73584	3.02E-07	4.72E-07	1.54E-02	0.00458	0.58832	0.19378	1.82E-06	3.46E-06	7.75E-09	0.09001	0.00593	2.15E-08
5	1.30274	0.76761	1.39E-11	3.91E-08	1.50E-09	0.00458	0.58832	0.19378	1.78E-07	1.13E-09	1.47E-01	0.09001	0.00593	0.14706
6	1.29150	0.77430	2.40E-08	7.84E-08	9.47E-07	0.00458	0.58832	0.19378	3.74E-07	1.19E-06	2.70E-05	0.09001	0.00593	0.14709
7	1.29128	0.77442	2.27E-08	2.42E-12	9.73E-07	0.00458	0.58832	0.19378	1.02E-11	1.20E-06	2.71E-09	0.09001	0.00594	0.14709
8	1.17516	0.85095	2.97E-03	1.38E-08	4.35E-04	0.00754	0.58832	0.19422	8.90E-06	3.08E-01	9.71E-09	0.09002	0.31429	0.14709
9	1.17245	0.85292	3.59E-06	1.99E-08	2.63E-01	0.00755	0.58832	0.45727	7.57E-06	4.87E-04	6.34E-09	0.09003	0.31478	0.14709
10	1.15592	0.86511	2.46E-10	1.01E-02	2.09E-06	0.00755	0.59842	0.45728	5.63E-01	3.71E-06	6.22E-08	0.65350	0.31478	0.14709
11	1.06173	0.94186	7.29E-07	6.98E-04	1.12E-07	0.00755	0.59912	0.45728	1.55E-02	1.14E-06	1.50E-05	0.66895	0.31478	0.14710
12	1.05727	0.94584	2.36E-06	4.70E-05	2.92E-07	0.00755	0.59917	0.45728	1.37E-03	3.14E-06	1.65E-04	0.67032	0.31478	0.14727
13	0.97961	1.02082	2.15E-07	7.53E-12	3.55E-11	0.00755	0.59917	0.45728	1.54E-08	5.62E-02	6.13E-12	0.67032	0.37095	0.14727
14	0.92016	1.08677	9.94E-08	2.40E-09	7.74E-02	0.00755	0.59917	0.53471	2.27E-07	6.64E-09	1.31E-09	0.67032	0.37095	0.14727
15	0.79277	1.26139	1.06E-06	1.28E-04	8.26E-08	0.00755	0.59930	0.53471	5.49E-02	2.26E-06	4.84E-04	0.72517	0.37095	0.14775
16	0.79218	1.26234	3.20E-05	4.90E-05	1.81E-06	0.00758	0.59934	0.53471	2.20E-02	1.19E-04	1.17E-03	0.74720	0.37107	0.14892
17	0.79095	1.26431	9.94E-04	4.10E-07	1.77E-07	0.00858	0.59935	0.53471	2.00E-04	1.97E-02	5.86E-06	0.74740	0.39080	0.14893
18	0.78275	1.27754	2.05E-07	1.70E-09	2.40E-02	0.00858	0.59935	0.55875	2.39E-06	5.63E-08	4.72E-08	0.74740	0.39080	0.14893
19	0.69541	1.43801	7.50E-03	2.18E-08	6.24E-08	0.01608	0.59935	0.55875	1.01E-07	1.78E-02	1.53E-08	0.74740	0.40863	0.14893
20	0.66952	1.49361	1.20E-05	9.30E-09	1.81E-02	0.01609	0.59935	0.57689	3.35E-09	1.61E-06	8.81E-09	0.74740	0.40863	0.14893
21	0.64986	1.53880	4.49E-04	1.30E-03	1.93E-09	0.01654	0.60065	0.57689	1.01E-02	3.40E-05	4.47E-10	0.75748	0.40866	0.14893
22	0.64840	1.54227	1.67E-01	4.66E-07	1.05E-04	0.18347	0.60065	0.57699	3.90E-05	1.26E-02	8.80E-06	0.75752	0.42122	0.14894
23	0.64614	1.54765	1.36E-04	1.17E-09	6.93E-07	0.18360	0.60065	0.57699	4.31E-08	1.00E-05	2.06E-03	0.75752	0.42123	0.15099
24	0.63572	1.57303	4.67E-03	6.00E-06	2.55E-03	0.18827	0.60065	0.57954	9.58E-06	3.23E-04	1.40E-05	0.75753	0.42155	0.15101
25	0.61961	1.61392	1.88E-07	1.93E-04	7.65E-09	0.18827	0.60085	0.57954	9.30E-05	1.27E-08	5.86E-04	0.75762	0.42155	0.15159
								⋮						
99	0.18834	5.30942	2.81E-08	2.46E-09	1.30E-04	0.72497	0.73757	0.66512	7.75E-10	2.05E-04	1.96E-09	0.79362	0.64029	0.51298
100	0.18815	5.31480	4.71E-07	4.44E-09	3.70E-05	0.72497	0.73757	0.66516	9.21E-10	1.35E-03	2.99E-09	0.79362	0.64164	0.51298

Cables de fibra de basalto de igual resistencia que los cables de acero

Las diferencias que se observan en cuanto a las propiedades dinámicas del puente son las siguientes: el primer modo tiene un periodo de 2.10 s, que es 20% mayor que el del puente con cables de acero y la participación de masa es 20% mayor. A diferencia de los otros puentes, el modo correspondiente al giro alrededor del eje transversal ocurre en el modo 8, antes que el giro alrededor del eje longitudinal (modo 10). El periodo asociado al giro transversal es 26% mayor que en el puente con cables de acero. Algo semejante ocurre con el segundo modo para el desplazamiento vertical pues se presenta antes (modo 9) que el modo del giro alrededor del eje longitudinal (modo 10). El periodo asociado al desplazamiento vertical es también 26% mayor que en el puente con cables de acero. El modo 22 es ahora el primer modo longitudinal y su periodo es 41% más grande que el del puente con cables de acero (T = 0.49 s). En la figura 3.11 se muestran los dos modos que sufrieron mayores incrementos en la magnitud del periodo de vibrar.

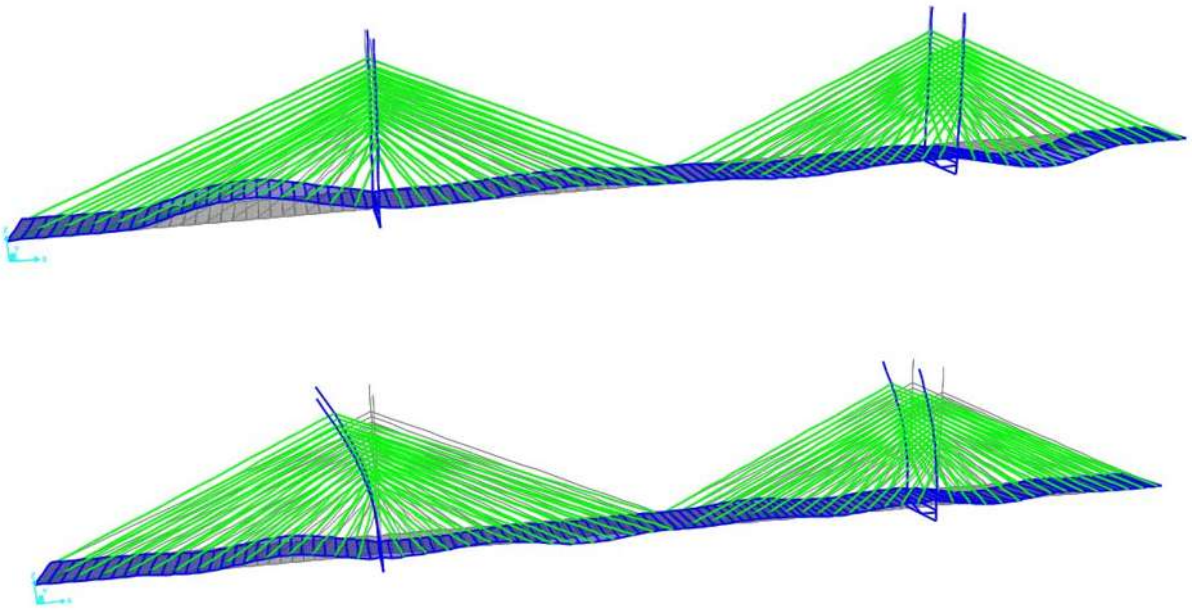


Figura 3. 11 Modos 8 y 22, asociados al primer modo de giro alrededor del eje transversal (t= 1.18s) y al primer modo longitudinal (t= 0.65 s) respectivamente.

En la figura 3.12 se muestra la variación del periodo para los primeros dos modos de vibrar para los desplazamientos longitudinales, transversales y verticales, y para los giros alrededor de los ejes longitudinal, transversal y vertical. Se observa que el puente con cables de fibra tiene periodos mayores con respecto al puente con cables de acero de alta resistencia.

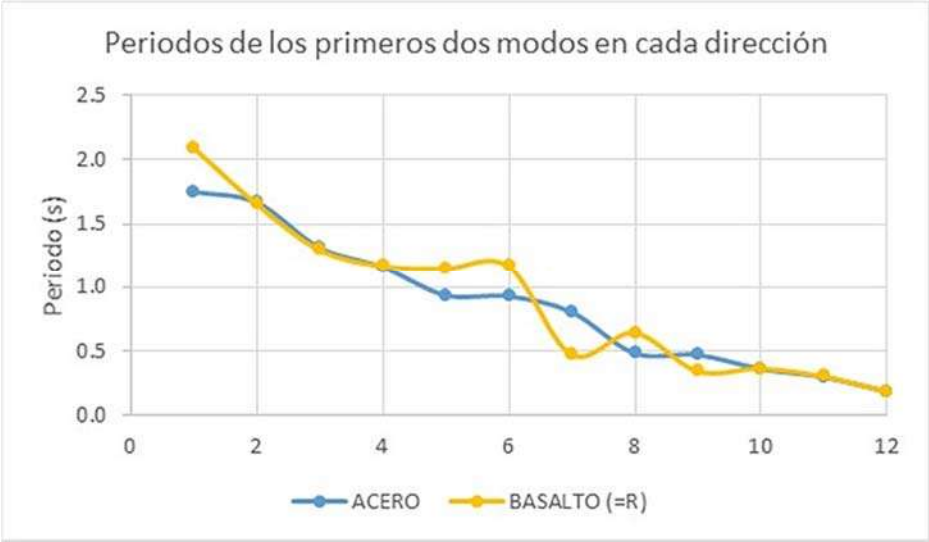


Figura 3. 12 Periodos para los dos primeros modos de cada dirección cuando se usan cables de fibra de basalto y cables de acero de alta resistencia

Al considerar 100 modos de vibrar, se alcanzaron porcentajes acumulados de participación de masa en el puente con cables de fibra de carbono comprendidos entre el 79% para el giro alrededor del eje longitudinal y el 51% para el giro alrededor del eje vertical.

Los primeros tres modos del puente con los tres tipos de cable se presentan en la figura 3.13, en donde se observa que el segundo modo, asociado al giro vertical, no presenta cambios en la frecuencia de vibración, sin embargo, en los modos uno y tres, se observa una mayor flexibilidad, y por tanto mayor periodo en el puente con cables de fibra de basalto y después en los cables de fibra de carbono.

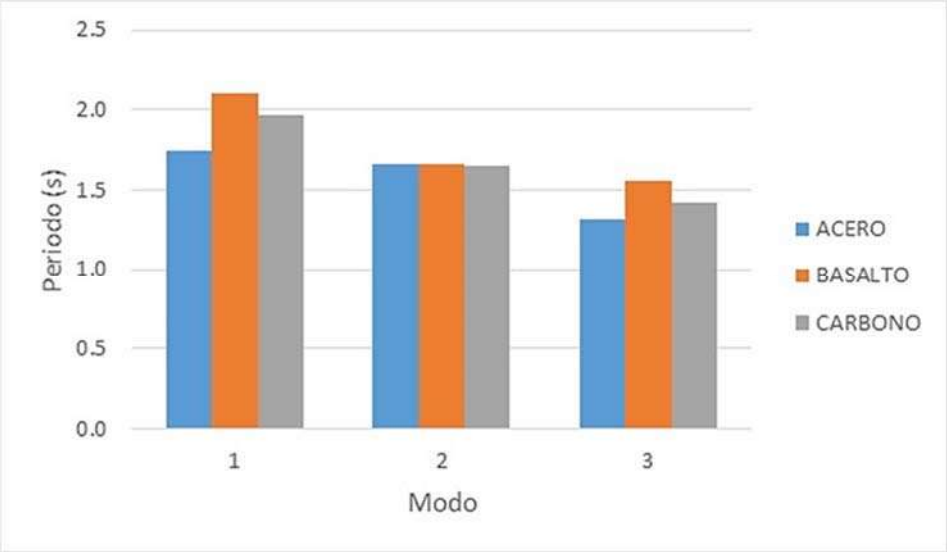


Figura 3. 13 Periodos de los tres primeros modos del puente considerando cables de acero, carbono y basalto

3.1.5 RESPUESTA MODAL CON CABLES DE FIBRA DE BASALTO (=K)

Al sustituir los cables de acero por cables de fibra de basalto, igualando la rigidez para los dos tipos de cable, se obtuvieron áreas más grandes con la fibra de basalto debido al menor módulo de elasticidad del material. El módulo de elasticidad del acero de alta resistencia es 2.26 veces el de fibras de basalto, como se aprecia en la tabla 3.8. En la tabla 3.9 se muestran los periodos, frecuencias y factores de participación modal de masa del puente con cables de fibra de basalto al igualar la rigidez de ambos sistemas.

Tabla 3. 8 Módulo de Elasticidad de los materiales

Material	Módulo de Elasticidad (t/m^2)
Acero de Alta Resistencia	21000000
Fibras de Basalto	9279418

Tabla 3. 9 Tabla de modos de vibrar. Puente con cables de fibra de basalto (=K)

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (ciclos/s)	Longitudinal	Transversal	Vertical	Sumatoria Longitunidal	Sumatoria Transversal	Sumatoria Vertical	Giro Longitunidal	Giro Transversal	Giro Vertical	Sumatoria de Giro Longitunidal	Sumatoria de Giro Transversal	Sumatoria de Giro Vertical
1	1.75528	0.56971	2.43E-08	6.7E-08	1.53E-01	2.43E-08	6.66E-08	0.15311	4.06E-09	1.21E-09	6.29E-11	4.06E-09	1.21E-09	6.29E-11
2	1.66635	0.60011	6.62E-09	5.89E-01	1.44E-08	3.096E-08	0.58885	0.15311	9.55E-02	9.20E-10	1.36E-08	0.09550	2.13E-09	1.37E-08
3	1.31150	0.76249	3.33E-11	1.01E-07	4.44E-11	3.10E-08	0.58885	0.15311	3.62E-07	1.24E-10	1.48E-01	0.09550	2.26E-09	0.14843
4	1.30345	0.76720	5.00E-03	8.77E-08	5.99E-09	0.00500	0.58885	0.15311	7.14E-07	4.00E-05	8.66E-11	0.09551	4.00E-05	0.14843
5	1.30029	0.76906	1.06E-06	1.95E-07	2.08E-07	0.00500	0.58885	0.15311	7.64E-07	1.56E-07	6.40E-05	0.09551	4.00E-05	0.14849
6	1.29996	0.76925	8.36E-07	1.66E-10	2.08E-07	0.00501	0.58885	0.15311	1.89E-11	1.66E-07	8.85E-09	0.09551	4.00E-05	0.14849
7	1.16044	0.86174	1.62E-10	1.16E-02	3.03E-09	0.00501	0.60041	0.15311	5.45E-01	3.43E-09	8.76E-08	0.64086	4.00E-05	0.14849
8	1.11133	0.89982	4.19E-08	2.60E-07	1.57E-03	0.00501	0.60041	0.15468	6.77E-07	4.69E-07	1.50E-08	0.64086	4.10E-05	0.14849
9	0.94408	1.05924	3.27E-03	3.29E-09	1.58E-06	0.00828	0.60041	0.15468	2.43E-07	2.65E-01	3.06E-09	0.64086	0.26456	0.14849
10	0.93682	1.06744	1.50E-09	2.75E-10	2.48E-01	0.00828	0.60041	0.40235	2.76E-08	1.30E-06	5.79E-10	0.64087	0.26456	0.14849
11	0.89786	1.11376	2.02E-07	4.99E-06	1.58E-09	0.00828	0.60041	0.40235	2.03E-02	1.11E-06	7.61E-06	0.66121	0.26456	0.14850
12	0.89427	1.11823	6.76E-07	1.35E-07	4.65E-09	0.00828	0.60041	0.40235	1.68E-03	2.68E-06	8.40E-05	0.66290	0.26456	0.14858
13	0.81049	1.23382	1.44E-04	9.37E-10	2.25E-08	0.00842	0.60041	0.40235	8.28E-08	6.66E-02	1.46E-10	0.66290	0.33114	0.14858
14	0.76413	1.30867	7.66E-08	6.25E-09	7.11E-02	0.00842	0.60041	0.47345	2.02E-07	5.03E-08	2.22E-09	0.66290	0.33114	0.14858
15	0.63156	1.58337	4.50E-07	2.48E-06	7.14E-08	0.00842	0.60041	0.47345	1.11E-03	1.04E-07	4.62E-03	0.66401	0.33114	0.15321
16	0.63121	1.58426	6.55E-07	1.39E-04	1.21E-07	0.00842	0.60055	0.47345	6.72E-02	1.38E-07	7.40E-05	0.73117	0.33114	0.15328
17	0.62347	1.60393	1.34E-04	1.28E-12	2.94E-07	0.00856	0.60055	0.47345	1.09E-07	6.28E-03	8.55E-09	0.73117	0.33742	0.15328
18	0.62276	1.60576	2.84E-08	2.45E-11	2.57E-02	0.00856	0.60055	0.49919	8.26E-08	2.98E-09	3.52E-09	0.73117	0.33742	0.15328
19	0.61153	1.63526	1.45E-03	1.16E-09	2.85E-09	0.01001	0.60055	0.49919	4.50E-08	5.18E-02	1.46E-09	0.73117	0.38919	0.15328
20	0.59008	1.69468	2.34E-07	4.43E-09	5.52E-02	0.01001	0.60055	0.55442	4.04E-10	1.24E-07	9.66E-10	0.73117	0.38919	0.15328
21	0.53652	1.86387	6.86E-06	2.96E-03	4.09E-07	0.01001	0.60351	0.55442	1.45E-02	1.60E-06	9.70E-05	0.74571	0.38919	0.15338
22	0.53566	1.86687	8.04E-06	1.40E-05	4.20E-07	0.01002	0.60353	0.55442	7.20E-05	1.98E-06	1.98E-02	0.74578	0.38919	0.17321
23	0.52669	1.89866	2.11E-03	4.51E-08	2.58E-07	0.01213	0.60353	0.55442	3.83E-07	4.16E-02	4.71E-07	0.74578	0.43082	0.17321
24	0.51516	1.94116	6.46E-06	2.27E-09	2.82E-02	0.01213	0.60353	0.58262	7.14E-08	1.41E-07	5.85E-08	0.74578	0.43082	0.17321
25	0.48683	2.05410	2.10E-01	1.49E-07	1.60E-05	0.22252	0.60353	0.58264	1.11E-06	2.97E-03	7.85E-08	0.74578	0.43380	0.17321
								⋮						
99	0.18807	5.31726	1.13E-08	4.14E-09	1.80E-05	0.72881	0.73867	0.66750	1.65E-09	1.27E-06	3.15E-09	0.79565	0.64179	0.51443
100	0.18569	5.38540	5.31E-07	5.23E-09	1.91E-09	0.72881	0.73867	0.66750	9.57E-10	1.43E-03	3.50E-09	0.79565	0.64322	0.51443

Cables de fibra de basalto de igual rigidez que los cables de acero

CAPÍTULO 4
ANÁLISIS BAJO DIFERENTES CASOS DE CARGA

4.1 CARGA MUERTA

Los cinco puentes se analizaron bajo la condición de carga muerta, que representa el peso propio de la estructura más el peso del asfalto, barandales y parapetos. El peso total de la estructura es de 19, 661 toneladas con una variación inferior al 1% por concepto del distinto peso que tienen los materiales que forman los cinco tipos de cables que se usaron en el estudio.

La carga muerta en el tablero está formada por el peso propio de los elementos que lo conforman (trabes longitudinales, trabes transversales y losa) y el peso de una capa de 12 cm de espesor de asfalto, que se distribuye uniformemente sobre todo el ancho del tablero, para representar la zona de rodadura, y que a su vez engloba el peso de los distintos elementos que van sobre el tablero (camellones, vallas de contención, etc.).

Para evaluar la respuesta de los puentes con distintos tipos de cable, se estudian los siguientes parámetros: momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas axiales sobre las trabes longitudinales, desplazamientos verticales en el claro principal y en la parte superior de las pilas, tensiones en los tirantes y los elementos mecánicos en la base de las pilas. A continuación, se describen los principales resultados que se obtienen cuando se considera únicamente el efecto de las cargas gravitacionales (peso propio de la estructura más sobrecarga).

4.1.1 RESPUESTA DEL TABLERO

Desplazamientos verticales

Al analizar el puente con los cables originales de acero de alta resistencia bajo, la acción de la carga muerta, se obtuvo un desplazamiento máximo vertical en el centro del puente, de 0.8 m, equivalente a 1/254 del claro principal, que excede el valor usual de 1/400 para la rigidez de este tipo de puentes (Wu & Wang, 2008). Al sustituir los cables de acero por cables de carbono y de basalto mediante la igualación de rigideces, los desplazamientos máximos resultaron de 0.77 y 0.8 metros respectivamente, muy parecidos al caso original, como era de esperarse. Al sustituir los cables de acero por cables de carbono mediante la igualación de resistencias, el desplazamiento máximo resultó de 1.04 metros, igual a 1/195 del claro principal.

El incremento se debe a la reducción de área que se obtiene cuando de intenta mantener el nivel de esfuerzo en los cables. Al sustituir los cables de acero por basalto, el desplazamiento se incrementa aún más, alcanzando un desplazamiento vertical de 1.18 metros igual a 1/172 del claro principal, lo cual excede 2.33 veces el valor usual de 1/400. Los valores de desplazamiento se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Desplazamiento vertical al centro del claro

Material	Desplazamiento (m)	Claro principal 1/L
Acero de alta Resistenca	0.80	1/254
Fibras de Carbono (=R)	1.04	1/195
Fibras de Carbono (=K)	0.77	1/264
Fibras de Basalto (=R)	1.18	1/172
Fibras de Basalto (=K)	0.80	1/254

Momentos longitudinales

Por lo que respecta a los momentos en las trabes longitudinales del puente con cables de acero, vemos que la distribución de momentos no sigue una distribución semejante a una viga continua y que se producen momentos globales de consideración (figura 4.1). Destacan los momentos negativos importantes en el claro de compensación, que son inclusive mayores que los que se producen en la zona de las pilas. Los momentos positivos que se producen al centro del claro principal son de gran magnitud, aunque los presentes en los claros de compensación alcanzan valores más elevados

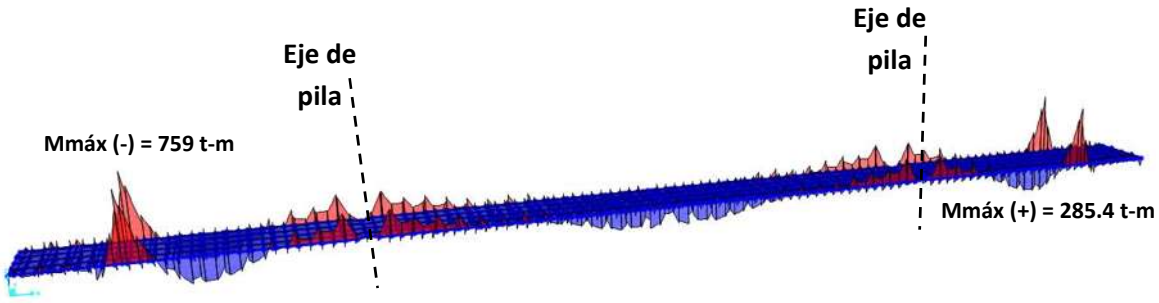


Figura 4. 1 Diagrama de momentos del puente con cables de acero de alta resistencia.

La distribución de los momentos a lo largo del eje longitudinal del puente no se modifica al cambiar los tipos de cables, únicamente presentan variaciones en su magnitud. Las diferencias en los diagramas de momentos que se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de carbono o basalto, cuando se aplica el criterio de igual rigidez, son de poca magnitud (7% y 2% respectivamente). Al considerar las áreas de los nuevos cables bajo el criterio de igual resistencia, los momentos con las fibras de carbono se incrementan hasta en un 32 %, y en el caso de las fibras de basalto hasta en 76%, como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3. Los valores de los momentos máximos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Momentos máximos

Material	Momento (+) (t-m)	M(+)/M(+)Acero	Momento (-) (t-m)	M(-)/M(-)Acero
Acero de alta Resistenca	285.41	1	759.03	1
Fibras de Carbono (=R)	325.74	1.14	998.90	1.32
Fibras de Carbono (=K)	270.04	0.95	809.06	1.07
Fibras de Basalto (=R)	442.85	1.55	1338.99	1.76
Fibras de Basalto (=K)	264.29	0.93	777.10	1.02

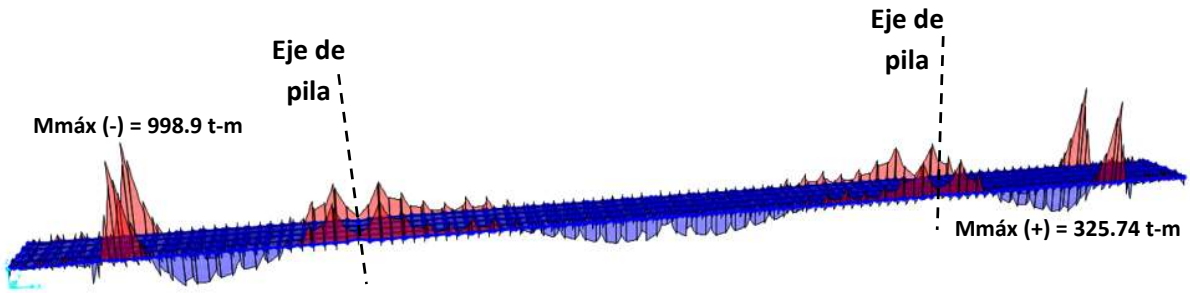


Figura 4. 2 Diagrama de momentos del puente con cables de fibra de carbono (=R)

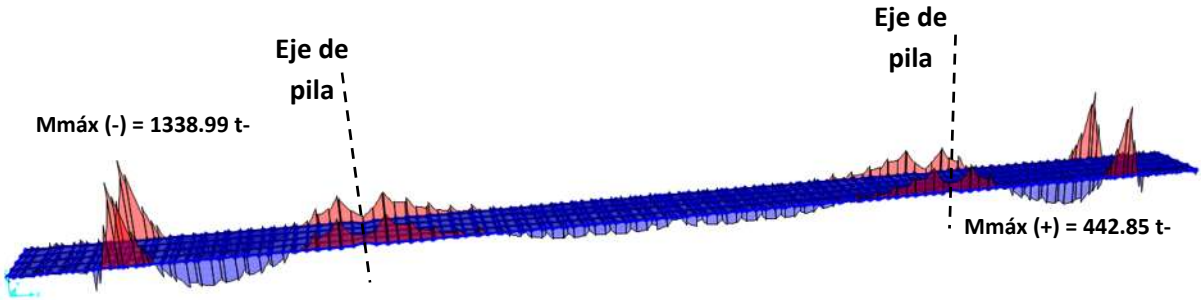


Figura 4. 3 Diagrama de momentos del puente con cables de fibras de basalto (=R)

Carga axial en trabes longitudinales

Al centro del claro principal se produce una fuerza de tensión, debida a la componente horizontal de los tirantes extremos. Conforme se acumula dicha componente horizontal en los cables sucesivos, la fuerza de tensión se transforma en una fuerza de compresión que alcanza valores altos en la zona de las pilas (figura 4.4). La carga axial de tensión en las trabes alcanza su valor máximo al centro del claro principal, y los valores más altos de compresión al inicio de los claros de compensación. Las diferencias que se observan en los diagramas de fuerza axial del puente con cables de acero de alta resistencia con respecto a los otros tipos de cable se muestran en la tabla 4.3. Destaca el caso de cables de fibra de basalto cuando se igualan las resistencias entre ambos tipos de cable (=R), pues se tiene un incremento de 103% en la carga axial máxima. Al sustituir los cables originales por cables de fibra de carbono con un área para igualar la resistencia el incremento en la fuerza es de 43%. Cuando se igualan las rigideces con las fibras de basalto y las fibras de carbono se observan incrementos de 3% y 8% respectivamente. En las figuras 4.5 y 4.6 se muestran los diagramas de carga axial.

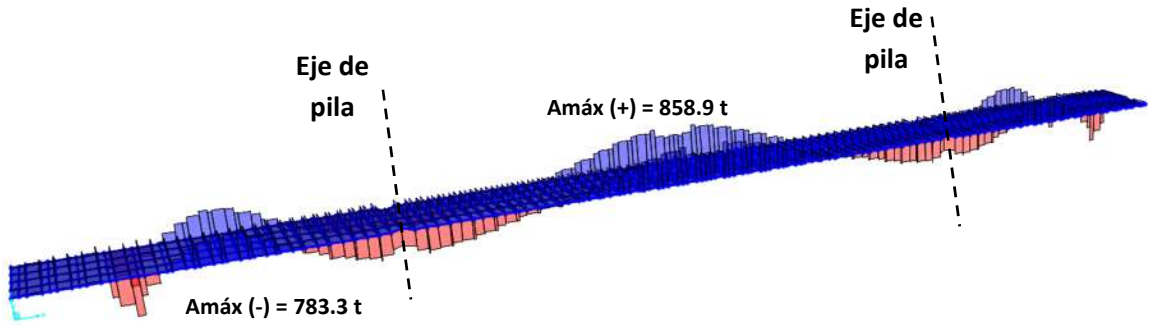


Figura 4. 4 Diagrama de carga axial del puente con cables de acero de alta resistencia.

Tabla 4. 3 Carga axial máxima

Material	Axial (+) (t)	A(+)/A(+)Acero	Axial (-) (t)	A(-)/A(-)Acero
Acero de alta Resistenca	858.86	1	783.29	1
Fibras de Carbono (=R)	833.51	0.97	1116.62	1.43
Fibras de Carbono (=K)	770.26	0.90	847.60	1.08
Fibras de Basalto (=R)	901.74	1.05	1595.01	2.04
Fibras de Basalto (=K)	785.87	0.92	804.09	1.03

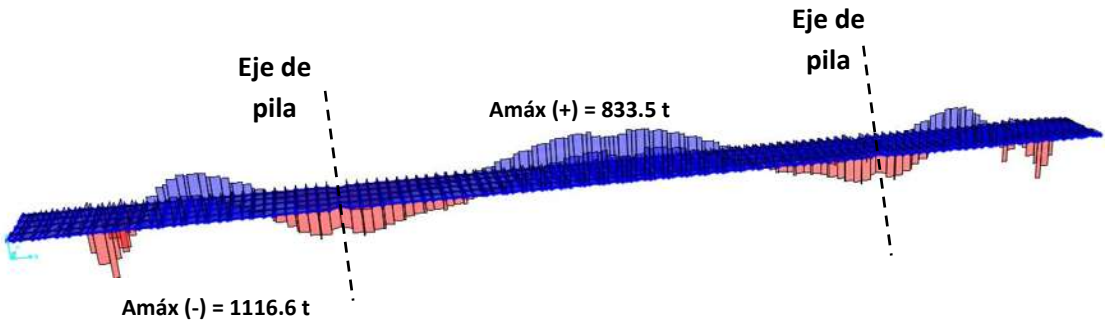


Figura 4. 5 Diagrama de carga axial del puente con cables de fibras de carbono (=R).

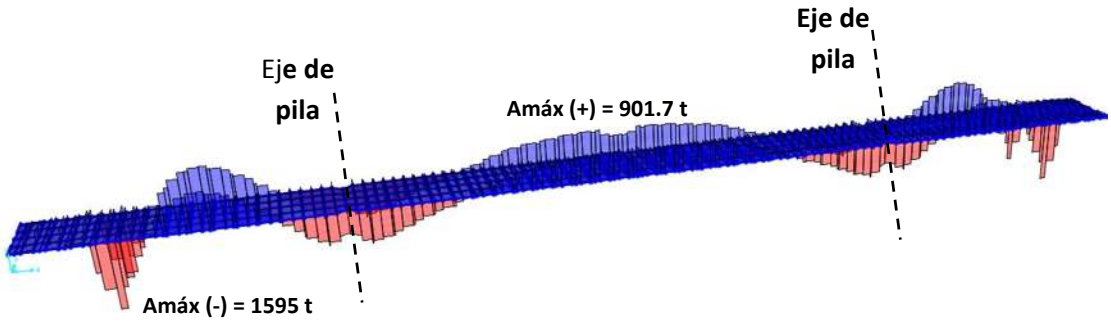


Figura 4. 6 Diagrama de carga axial del puente con cables de fibras de basalto (=R).

4.1.2 RESPUESTA DE LAS PILAS

Debido a la gran altura de las pilas y a las componentes horizontales de los cables, se pueden presentar desplazamientos importantes en su punto más alto. El diseño ideal consiste en obtener un desplazamiento horizontal igual a cero en la parte superior de la pila bajo la condición de carga permanente, para no tener momentos flexionantes durante la vida útil del puente, sin embargo, no siempre se logra esta condición.

A continuación, se describen los desplazamientos y elementos mecánicos en las pilas para los distintos tipos de cables, cuando se considera únicamente el efecto de las cargas gravitacionales (peso propio de la estructura más sobrecarga).

Desplazamientos longitudinales

Al analizar el puente con cables de acero de alta resistencia bajo la acción de la carga muerta, se obtuvo un desplazamiento máximo longitudinal en el extremo más alto de la pila de 0.20 metros, diferente del estado inicial del puente idealizado mediante el principio de momentos mínimos en las trabes y pilas principales (Wu & Wang, Investigation on a thousand-meter scale cable-stayed bridge with fibre composite cables, 2008). Al sustituir los cables de acero por cables de carbono y de basalto mediante la igualación de rigideces, los desplazamientos máximos resultaron de 0.20 y 0.21 respectivamente. Los valores de desplazamiento para los cinco tipos de cable se muestran en la tabla 4.4. El desplazamiento mayor se da al sustituir los cables de acero por fibras de basalto, igualando las resistencias, esto debido a la reducción del área que se obtiene cuando se intenta mantener el nivel de esfuerzo en los cables. Para aproximarse a la condición ideal, es decir, sin deflexión horizontal del extremo superior de las pilas, sería necesario considerar nuevamente los valores de tensión de los distintos tipos de cable y quizá, en alguno de los casos extremos, modificar las áreas propuestas. En este trabajo se decidió mantener la misma área que se utilizó en todos los análisis para no alterar la evaluación global del sistema.

Tabla 4. 4 Desplazamiento máximo en el extremo superior de la pila

Material	Desplazamiento (m)
Acero de alta Resistenca	0.20
Fibras de Carbono (=R)	0.23
Fibras de Carbono (=K)	0.20
Fibras de Basalto (=R)	0.26
Fibras de Basalto (=K)	0.21

Los valores se obtuvieron de la pila #4

Momentos verticales

Las pilas del puente con cables de acero presentan momentos globales de importancia. Destacan los momentos máximos en la base de la pila, y como hace el cambio de momento positivo a negativo a la altura de 42.7 metros, presentado el momento máximo negativo a 45.25 metros (figura 4.7). Por ser un extremo libre, el momento en el punto más alto de las pilas es igual a 0.

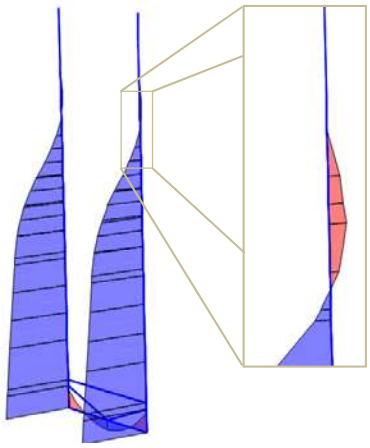


Figura 4. 7 Diagrama de momentos del puente con cables de acero de alta resistencia.

Las diferencias en los diagramas de momentos que se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de carbono o basalto, cuando se aplica el criterio de igual rigidez, son de poca magnitud (2% y 1% respectivamente).

Al considerar las áreas de los nuevos cables bajo el criterio de igual resistencia, los momentos con las fibras de carbono se incrementan hasta en un 18 %, en el caso de las fibras de basalto es apenas de un 4%. Los valores de los momentos máximos se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4. 5 Momentos máximos

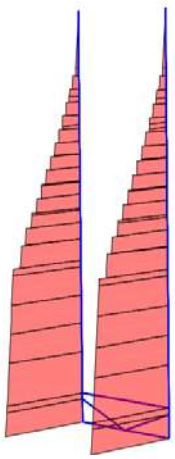
Material	Momento (+) (t-m)	M(+)/M(+)Acero	Momento (-) (t-m)	M(-)/M(-)Acero
Acero de alta Resistenca	3112.78	1	77.45	1
Fibras de Carbono (=R)	3666.67	1.18	35.67	0.46
Fibras de Carbono (=K)	3063.88	0.98	16.15	0.21
Fibras de Basalto (=R)	2997.41	0.96	0	0
Fibras de Basalto (=K)	3071.38	0.99	12.33	0.16

Carga axial en las pilas

La carga axial en el puente con cables de acero alcanza sus valores más altos en la base de las pilas (figura 4.8), mientras que a medida que se acerca a la parte superior esta tiende a 0. Las diferencias que se observan en los diagramas de fuerza axial del puente con cables de acero de alta resistencia con respecto a los otros tipos de cables se muestran en la tabla 4.6. Al sustituir los cables de acero con cables de otros materiales, la diferencia más significativa se encuentra al sustituir los cables de acero con cables de fibras de basalto igualando las resistencias, siendo esta diferencia del 6% (figura 4.9)

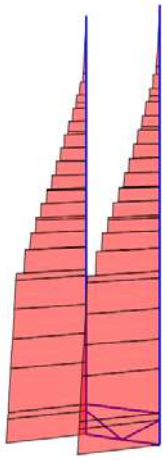
Tabla 4. 6 Carga axial máxima

Material	Axial (-) (t)	A(-)/A(-)Acero
Acero de alta Resistenca	4207.83	1
Fibras de Carbono (=R)	4051.94	0.96
Fibras de Carbono (=K)	4170.97	0.99
Fibras de Basalto (=R)	3976.62	0.95
Fibras de Basalto (=K)	4192.69	0.996



Amáx (-) = 4207.8 t

Figura 4. 8 Diagrama de carga axial del puente con cables de acero de alta resistencia.



Amáx (-) = 3976.6 t

Figura 4. 9 Diagrama de carga axial del puente con cables de fibra de basalto (=R).

4.1.3 RESPUESTA DE LOS CABLES

La carga axial a la que están sujetos los cables varía en función de su geometría y la ubicación de estos en el tablero. Los cables mostrados en la figura 4.10 presentan las cargas más significativas debido a su ubicación en el tablero. Se analizaron los 112 tirantes que conforman cada puente, y se eligieron los tirantes 3,7,8 y 14 de la pila número 4, semi-arpa 7, ya que presentan la carga axial más alta. Las magnitudes de dichos cables respecto a las otras semi-arpas no tienen una variación significativa.

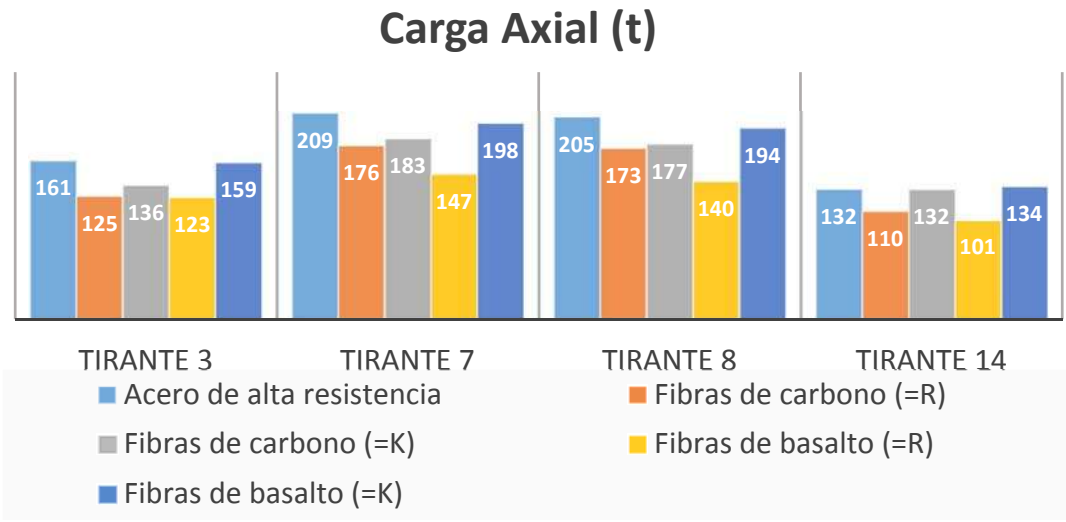


Figura 4. 10 Carga axial en los tirantes 3, 7, 8 y 14

En la tabla 4.7, se muestra la variación de la carga axial de los cables de acero de alta resistencia con respecto a los cables de fibra de carbono y fibra de basalto.

Tabla 4. 7 Variación de la carga axial

Tirante	Variación Acero-Carbono (=R)	Variación Acero-Carbono (=K)	Variación Acero-Basalto (=R)	Variación Acero-Basalto (=K)
3	29%	18%	30%	1%
7	19%	14%	42%	5%
8	18%	16%	47%	6%
14	20%	0%	31%	2%

Como se observa en la tabla anterior, al tener una sección transversal más grande al igualar la rigidez del acero de alta resistencia con las fibras de carbono y las fibras de basalto, se obtiene una variación menor en la carga axial. Por otra parte, la disminución de la sección transversal de los cables al igualar la resistencia hace que la carga axial disminuya, por lo que una opción a considerar es analizar el comportamiento de cables híbridos, una mezcla de ambos materiales para encontrar el porcentaje óptimo de cada uno.

4.2 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL

En esencia, un sismo es una vibración del suelo, como tal, tiene un contenido de frecuencias, una duración y una aceleración máxima características. Los estudios de mapas de riesgo, estadísticos e históricos permiten la determinación de un valor de aceleración básica del suelo, representativo de la acción dinámica sísmica.

La vibración del suelo es transmitida a toda la estructura a través de sus soportes, y como consecuencia de ella, las principales masas de la misma se moverán o desplazarán de forma relativa respecto al suelo. Es decir, se puede simplificar todo el sistema suponiendo que un sismo “genera” fuerzas horizontales en los elementos de la estructura de magnitud determinada y, además, variables en el tiempo.

Las normas sísmicas recurren al concepto de “Espectro de diseño” para permitir un cálculo más sencillo, y con aproximación a la realidad suficiente, del efecto del movimiento sobre una estructura. El espectro de diseño es en realidad una gráfica que representa la respuesta máxima (aceleración, velocidad o desplazamiento) a la que responde una estructura con un periodo natural “T” conocido para la región o zona sísmica donde se ubica la estructura en estudio (figura 4.1).

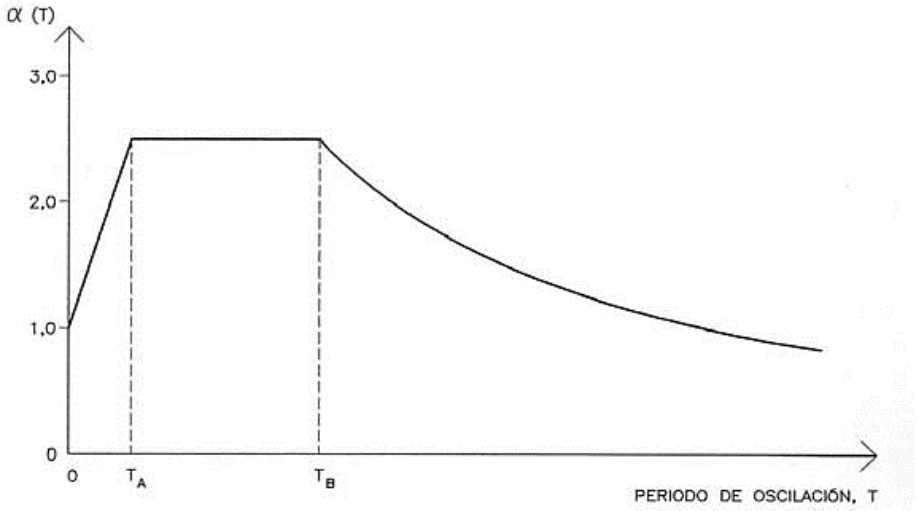


Figura 4.1 Espectro de diseño.
(Lavado & Granados, 2012)

El análisis modal espectral se basa en el uso de espectros de diseño, y permite determinar las respuestas máximas en las masas concentradas para estructuras complejas en el rango elástico lineal, al presentarlas mediante un oscilador simple. Además de la respuesta máxima, es necesario combinar las respuestas modales de acuerdo a reglas de combinación modal, tales como la regla de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados máximos SRSS (Square Root of Sum of Squares) o la combinación cuadrática completa CQC (Complete Quadratic Combination) (Valdebenito & Aparicio, 2005).

El Manual de Obras Civiles del 2008, emitido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con el programa PRODISIS (Programa de Diseño Sísmico), el cual permite calcular la aceleración máxima del terreno en roca, introduciendo las coordenadas o el nombre del municipio y estado, además de la importancia estructural (estructuras del grupo A+, A y B).

Para este análisis, se determinaron los espectros de diseño para las localidades mostradas en la tabla 4.8. La acción sísmica horizontal se define por dos componentes ortogonales independientes entre sí (X y Y), por lo que se tienen registros en dirección X y en dirección Y. De esta manera, los espectros de diseño obtenidos para estructuras del grupo A se muestran en la figura 4.11.

Tabla 4. 8 Ubicación donde se generaron los espectros de diseño

Estado	Municipio
Nayarit	Compostela
Jalisco	Puerto Vallata
Colima	Manzanillo
Michoacán	Lázaro Cárdenas
Guerrero	Acapulco
Oaxaca	Salina Cruz
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez
Sonora	Hermosillo
Baja California Sur	Los Cabos

Figura 4. 11 Espectros de diseño

4.2.1 RESPUESTA DEL TABLERO

Para evaluar la respuesta de los puentes con distintos tipos de cable, se estudian los siguientes parámetros: momentos flexionantes, fuerzas axiales sobre las trabes longitudinales, desplazamientos verticales en el claro principal y en la parte superior de las pilas, tensiones en los tirantes y los elementos mecánicos en la base de las pilas. A continuación, se describen los principales resultados obtenidos en dirección X y en dirección Y, considerando los nueve espectros de respuesta.

Desplazamientos verticales

Al analizar el puente con cables de acero de alta resistencia con los 18 espectros de respuesta (9 en el eje X y 9 en el eje Y), se obtuvieron desplazamientos verticales en el centro del claro principal de poca magnitud. Los desplazamientos más grandes corresponden al espectro de diseño del municipio de Lázaro Cárdenas con 0.003 m en eje X y 0.009 m en eje Y. Al sustituir los cables de acero mediante la igualación de rigideces, las fibras de carbono presentan el valor máximo de desplazamiento con 0.003 m en el eje X y 0.002 m en el eje Y. De igual manera, al igualar las resistencias, el puente con cables de fibra de carbono y fibras de basalto presenta el valor máximo de desplazamiento con 0.005 m en el eje X, mientras que en el eje Y el puente con fibras de carbono tiene un desplazamiento máximo de 0.004 m. En la tabla 4.9 se muestran los desplazamientos máximos.

Tabla 4. 9 Valores máximos de desplazamiento

Desplazamiento vertical en el eje X					
Localidades	**Acero de Alta Resistencia**	**Fibras de Carbono (=R)**	**Fibras de Carbono (=K)**	**Fibras de Basalto (=R)**	**Fibras de Basalto (=K)**
Lázaro Cárdenas	0.003	0.005	0.003	0.005	0.002
Acapulco	0.003	0.005	0.003	0.005	0.002
Manzanillo	0.003	0.005	0.003	0.005	0.002

Desplazamiento vertical en el eje Y					
Localidades	**Acero de Alta Resistencia**	**Fibras de Carbono (=R)**	**Fibras de Carbono (=K)**	**Fibras de Basalto (=R)**	**Fibras de Basalto (=K)**
Lázaro Cárdenas	0.009	0.004	0.002	0.002	0.001
Acapulco	0.009	0.004	0.002	0.002	0.001
Manzanillo	0.010	0.004	0.002	0.002	0.001

Momentos longitudinales

Por lo que respecta a los momentos en las trabes longitudinales del puente con cables de acero, vemos que la distribución es prácticamente de un solo signo (momentos flexionantes negativos). Los momentos máximos para el espectro en el eje X, se presentan al centro del claro, aunque también se producen momentos significativos al inicio de los claros de compensación, mientras que los momentos máximos para el espectro en el eje Y, se presentan al inicio del claro de compensación (figura 4.12). Los valores más altos dentro de los nueve espectros de respuesta considerados corresponden a los municipios de Manzanillo, Acapulco y Lázaro Cárdenas, los cuales a su vez presentan una diferencia mínima entre ellos menor al 4%, por lo que en lo sucesivo será el espectro de diseño asociado al municipio de Manzanillo el que se use por presentar los valores más altos.

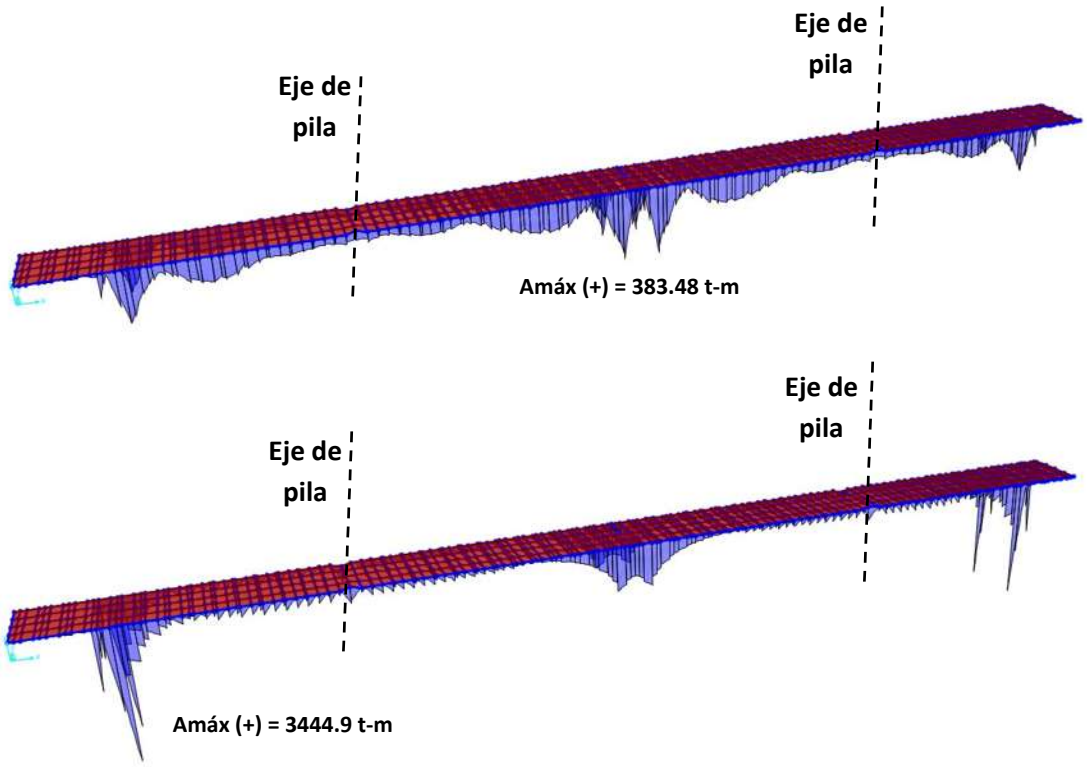


Figura 4. 12 Diagrama de momentos del puente con cables de acero de alta resistencia. Espectro de diseño en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

La distribución de los momentos a lo largo del eje longitudinal del puente no se modifica al cambiar los tipos de cables, únicamente presentan variaciones en su magnitud. Las diferencias en los diagramas de momentos que se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de carbono o basalto, cuando se aplica el criterio de igual rigidez, son de poca magnitud en ambos ejes (8% y 1% respectivamente). Al considerar las áreas de los nuevos cables bajo el criterio de igual resistencia, los momentos con las fibras de carbono al igual que con las fibras de basalto, se incrementan un 27% en ambos ejes, como se muestra en las figuras 4.13 y 4.14. Los valores de los momentos máximos se muestran en la tabla 4.10.

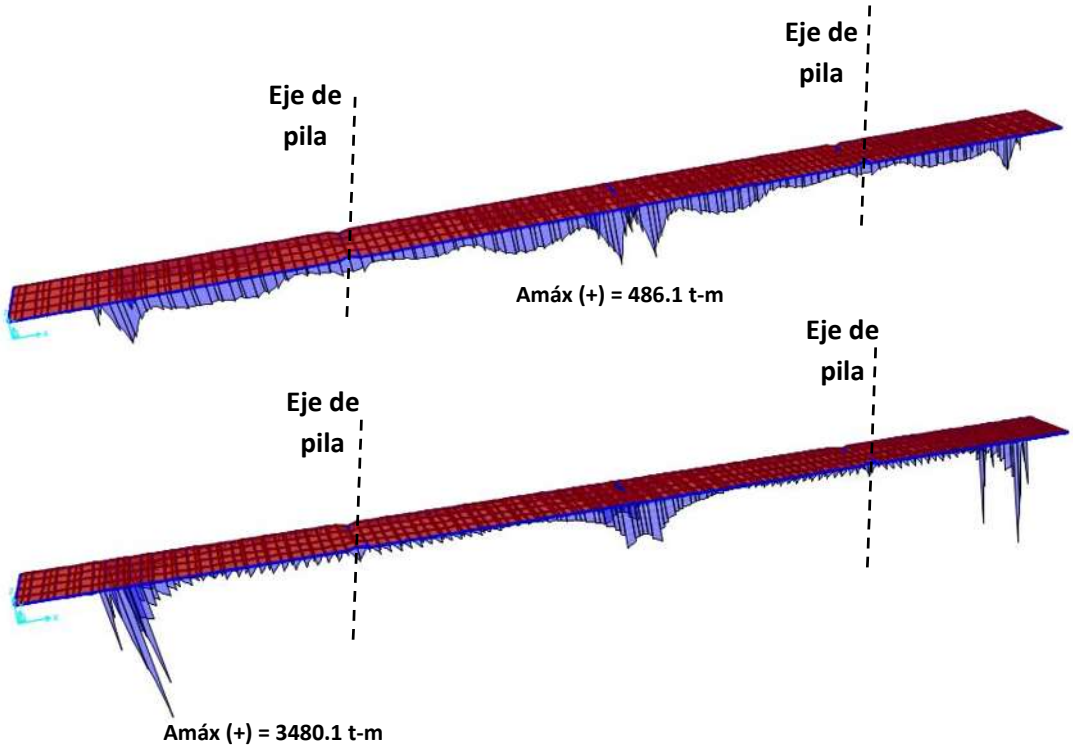


Figura 4. 13 Diagrama de momentos del puente con cables de fibra de carbono (=R). Espectro de diseño en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

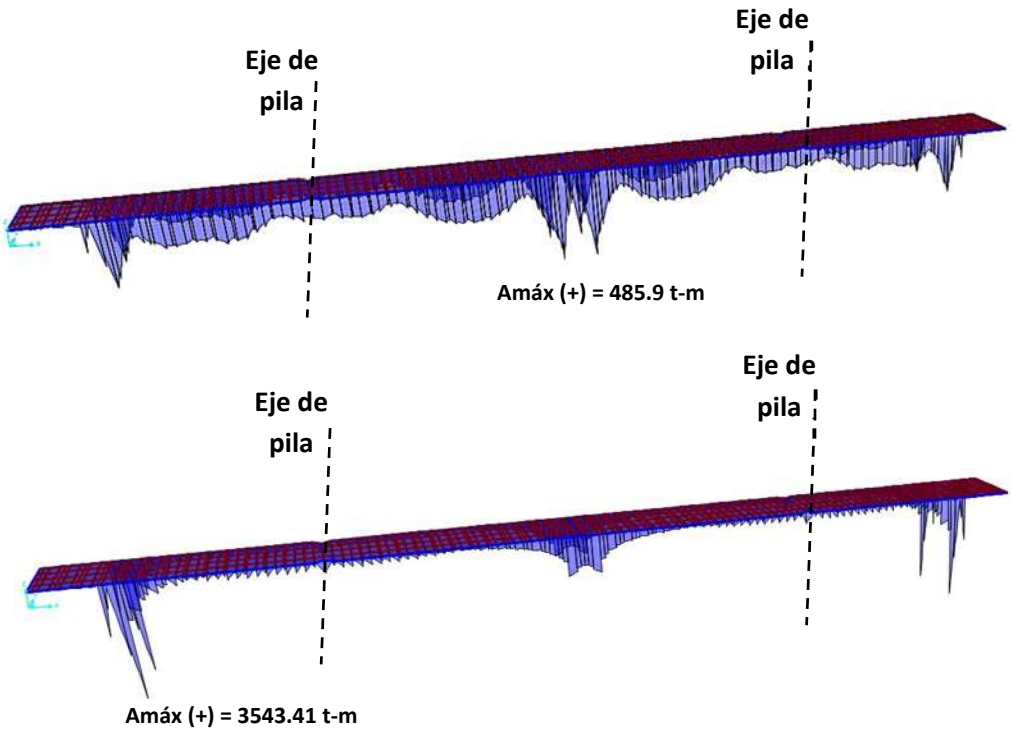


Figura 4. 14 Diagrama de momentos del puente con cables de fibra de basalto (=R). Espectro de diseño en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

Tabla 4. 10 Momentos máximos

Materiales	Momento(+) en X (t-m)	M(+)/M(+)Acero	Momento(+) en Y (t-m)	M(+)/M(+)Acero
Acero de Alta Resistencia	383.48	1	3444.88	1
Fibras de Carbono (=R)	486.13	1.27	3480.11	1.01
Fibras de Carbono (=K)	353.46	0.92	3428.49	1.00
Fibras de Basalto (=R)	485.92	1.27	3543.41	1.03
Fibras de Basalto (=K)	378.13	0.99	3450.91	1.00

Momentos obtenidos a partir del espectro de diseño asociado al municipio de Manzanillo

Carga axial en trabes longitudinales

La fuerza axial de tensión máxima asociada al espectro de diseño en el eje X se presenta al inicio de los claros de compensación, disminuyendo conforme se acerca al centro del claro principal donde su magnitud es prácticamente cero. De igual manera, para el espectro de diseño en el eje Y, la fuerza axial de tensión máxima se presenta al inicio de los claros de compensación, disminuyendo considerablemente en la zona de las pilas, e incrementando su magnitud nuevamente conforme se acerca al centro del claro principal (figura 4.15).

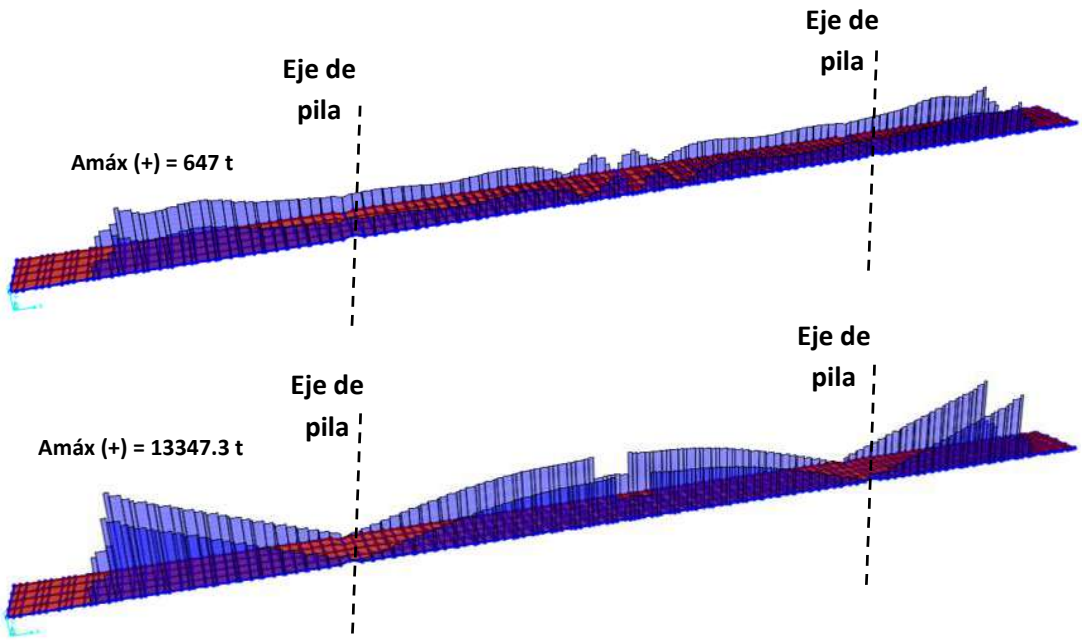


Figura 4. 15 Diagrama de carga axial del puente con cables de acero de alta resistencia. Espectro de diseño en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

Las diferencias que se observan en los diagramas de fuerza axial del puente con cables de acero de alta resistencia con respecto a los otros tipos de cable se muestran en la tabla 4.11. Al igualar las rigideces con las fibras de carbono y las fibras de basalto, las diferencias en magnitud soy muy pequeñas (8% y 1% respectivamente). Cuando se igualan las resistencias en el eje X, se presenta un incremento del 27% para las fibras de carbono y las fibras de basalto por igual, mientras que en el eje Y la diferencia es menor al 3% (figura 4.16).

Tabla 4. 11 Carga axial máxima

Materiales	Axial(+) en X (t)	A(+)/A(+)Acero	Axial(+) en Y (t)	A(+)/A(+)Acero
Acero de Alta Resistencia	646.95	1	13347.3	1
Fibras de Carbono (=R)	670.43	1.04	13320.28	1.00
Fibras de Carbono (=K)	612.27	0.95	13239.83	0.99
Fibras de Basalto (=R)	680.95	1.05	13404.71	1.00
Fibras de Basalto (=K)	635.91	0.98	13322.16	1.00

Carga axial obtenida a partir del espectro de respuesta asociado al municipio de Manzanillo

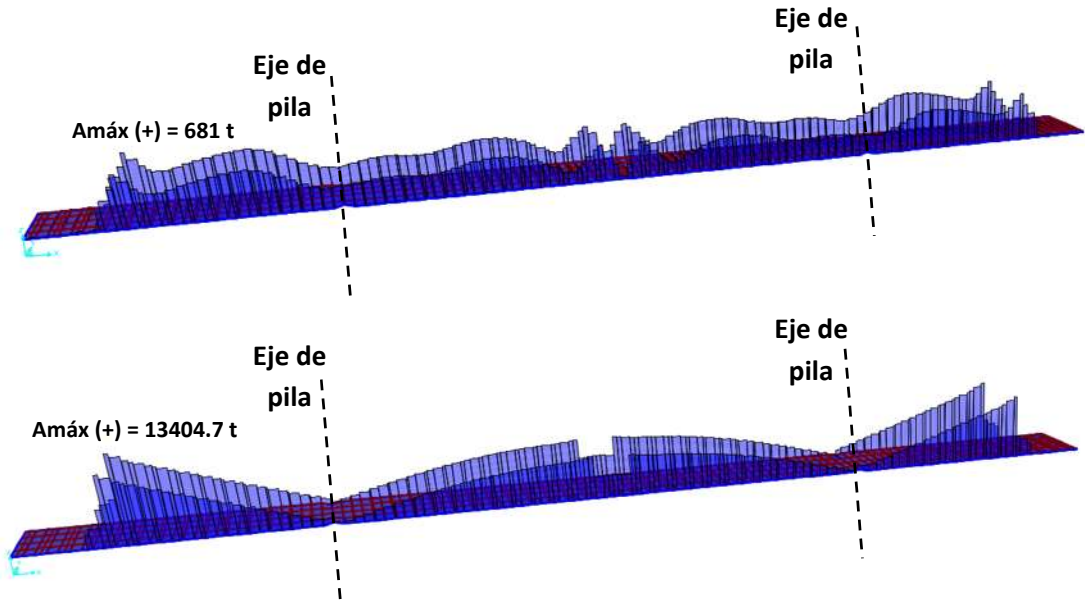


Figura 4. 16 Diagrama de carga axial del puente con cables de fibras de basalto (=R). Espectro de diseño en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

4.2.2 RESPUESTA DE LAS PILAS

Como se mencionó anteriormente, la componente horizontal de los cables y la gran altura de las pilas, pueden provocar un desplazamiento importante en su punto más alto, aunque se diseñen para que dicho desplazamiento no ocurra o tienda lo más posible a cero. A continuación, se describen los desplazamientos y elementos mecánicos en las pilas para los distintos tipos de cables cuando se utilizan espectros de diseño en sus dos componentes ortogonales (X y Y).

Desplazamientos longitudinales

Al analizar el puente con cables de acero de alta resistencia con los nueve espectros en el eje X y nueve en el eje Y, se obtuvieron desplazamientos longitudinales en el extremo superior de las pilas. El desplazamiento más importante se da con el espectro de diseño correspondiente al municipio de Manzanillo con 0.12 m en el eje X y 0.05 m en el eje Y. Los valores de desplazamiento para los cinco tipos de cable se muestran en la tabla 4.12. Al sustituir los cables de acero por fibras de basalto, igualando las resistencias se da el mayor desplazamiento (0.21 m en el eje X), esto debido a la reducción del área que se obtiene cuando se intenta mantener el nivel de esfuerzo en los cables.

Tabla 4. 12 Desplazamientos máximos

Materiales	Desplazamiento con el espectro de diseño en el eje X	Desplazamiento con el espectro de diseño en el eje Y
Acero de Alta Resistencia	0.12	0.04
Fibras de Carbono (=R)	0.16	0.07
Fibras de Carbono (=K)	0.12	0.04
Fibras de Basalto (=R)	0.21	0.08
Fibras de Basalto (=K)	0.12	0.05

Los valores se obtuvieron de la pila #4

Momentos verticales

Las pilas del puente con cables de acero presentan momentos globales importantes, presentándose el momento máximo a 3/4 de la altura de la pila (35 m) con el espectro de diseño en el eje X, mientras que el momento máximo en el eje Y se presenta en la base de la pila (figura 4.17).

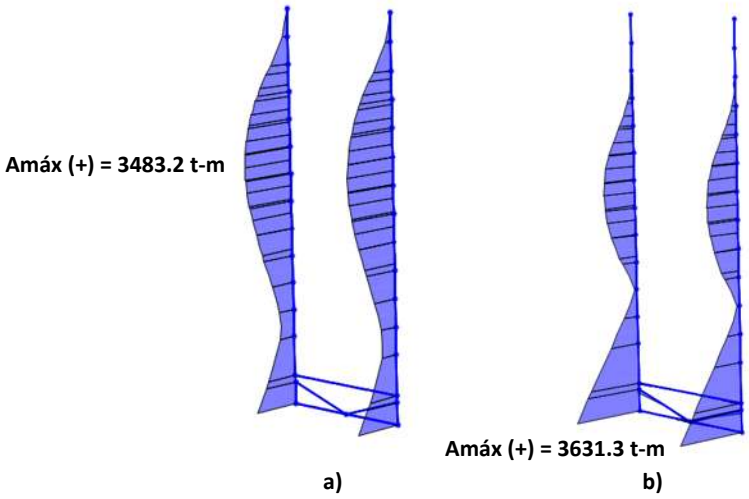


Figura 4. 17 Momento máximo con el espectro de diseño en el eje X (a) y en el eje Y (b)

Las diferencias en los diagramas de momentos usando el espectro de diseño correspondiente al municipio de Manzanillo que se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de carbono o basalto, cuando se aplica el criterio de igual rigidez, son menores al 3% con el espectro de diseño en el eje X, y menores al 1% en el eje Y. Al considerar las áreas de los nuevos cables bajo el criterio de igual resistencia, los momentos con las fibras de basalto se incrementan hasta en un 18 % en el eje X, y en el caso de las fibras de carbono es de un 11% en el eje Y. Los valores de los momentos máximos se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4. 13 Momentos máximos

Materiales	Momento(+) en X (t-m)	M(+)/M(+)Acero	Momento(+) en Y (t-m)	M(+)/M(+)Acero
Acero de Alta Resistencia	3483.24	1	3631.26	1
Fibras de Carbono (=R)	3866.68	1.11	3834.57	1.06
Fibras de Carbono (=K)	3382.09	0.97	3591.15	0.99
Fibras de Basalto (=R)	4125.86	1.18	3905.19	1.08
Fibras de Basalto (=K)	3471.92	1.00	3657.96	1.01

Momentos obtenidos a partir del espectro de diseño asociado al municipio de Manzanillo

Carga axial en las pilas

La carga axial en el puente con cables de acero alcanza su máximo a ¼ de la altura de las pilas (14 m) con el espectro de diseño en el eje X, y en la base de las pilas en el eje Y, mientras que a medida que se acerca a la parte superior esta tiende a 0 (cero) como se muestra en las figuras 4.18 y 4.19. Las diferencias que se observan en los diagramas de fuerza axial del puente con cables de acero de alta resistencia con respecto a los otros tipos de cables se muestran en la tabla 4.14. Al sustituir los cables de acero con cables de otros materiales, la diferencia más significativa se encuentra al sustituir los cables de acero con cables de fibras de carbono igualando las resistencias, siendo esta diferencia del 14% en el eje X (figura 4.20).

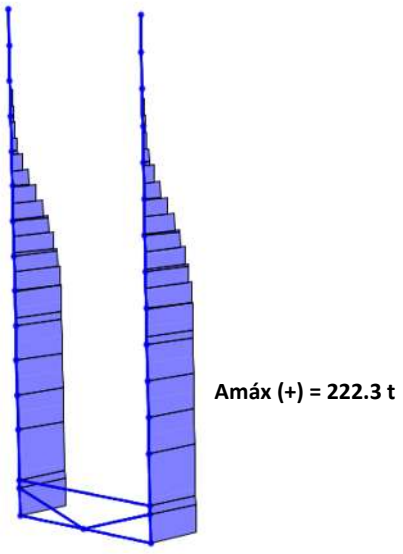


Figura 4. 18 Carga axial máxima con el espectro de diseño en el eje X.

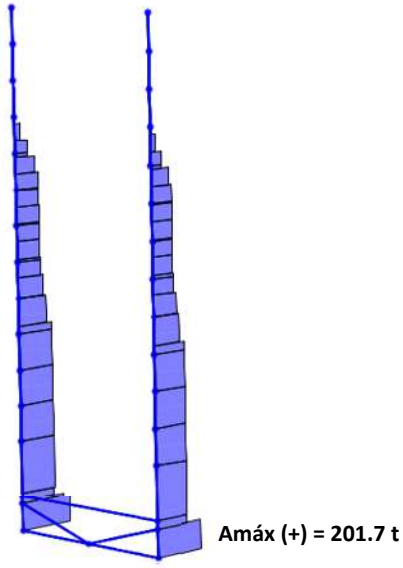
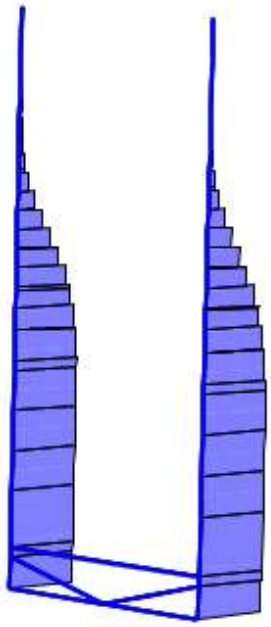


Figura 4. 19 Carga axial máxima con el espectro de diseño en el eje Y.

Tabla 4. 14 Carga axial máxima

Materiales	Axial(+) en X (t)	A(+)/A(+)Acero	Axial(+) en Y (t)	A(+)/A(+)Acero
Acero de Alta Resistencia	222.26	1	201.66	1
Fibras de Carbono (=R)	254.23	1.14	177.13	0.88
Fibras de Carbono (=K)	211.78	0.95	183.15	0.91
Fibras de Basalto (=R)	237.25	1.07	173.57	0.86
Fibras de Basalto (=K)	222.61	1.00	199.26	0.99

Carga axial obtenida a partir del espectro de respuesta asociado al municipio de Manzanillo



Amáx (+) = 254.2 t

Figura 4. 20 Carga axial máxima con cables de fibras de carbono (=R). Espectro de diseño en el eje X.

4.2.3 RESPUESTA DE LOS CABLES

La carga axial presente en los cables de acero de alta resistencia se generó a partir de la acción de los nueve espectros de diseño utilizados correspondientes a los mismos nueve estados de la República Mexicana que se mencionaron, divididos en sus componentes ortogonales por lo que se tienen nueve espectros de diseño en el eje X y nueve en el eje Y. La carga axial máxima para los cables de acero de alta resistencia se obtuvo con el espectro de diseño asociado al municipio de Manzanillo (figuras 4.21 y 4.22). Se analizaron los 112 cables que conforman el puente, y se eligieron los tirantes 3,7,8 y 14 de la pila número 4, semi-arpa 7, ya que presentan la carga axial más alta. Las magnitudes de dichos cables respecto a las otras semi-arpas no tienen una variación significativa.

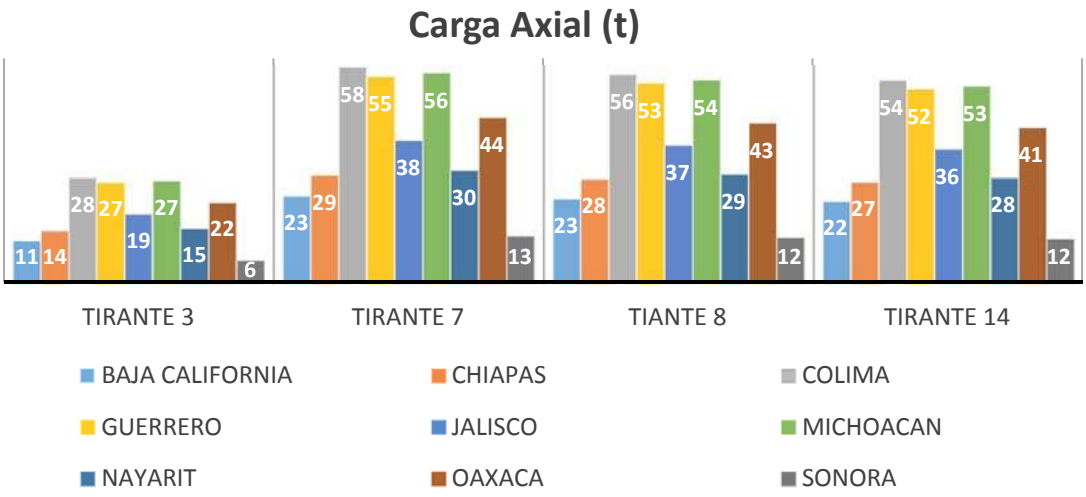


Figura 4. 21 Carga axial en los tirantes 3, 7, 8 y 14 con el espectro de respuesta en el eje X

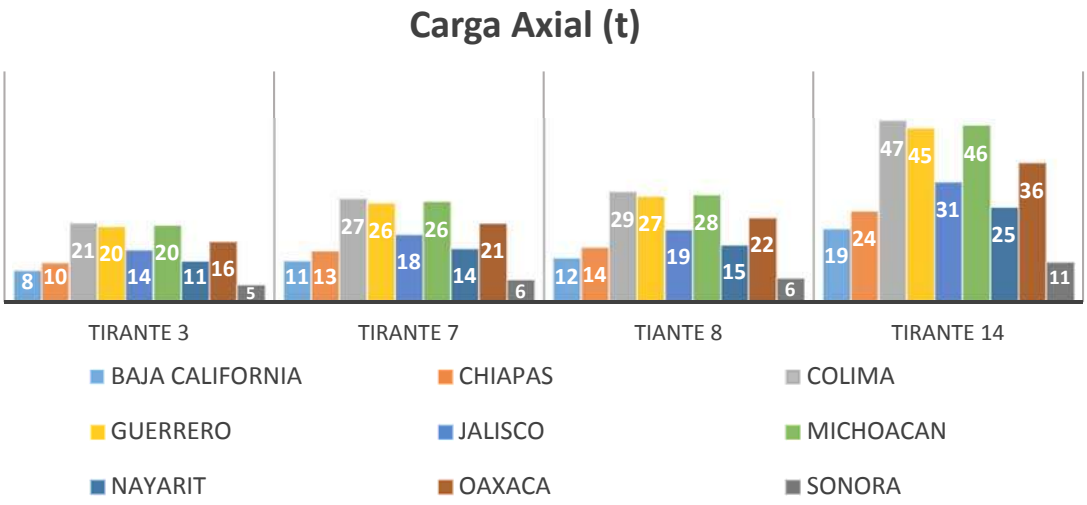


Figura 4. 22 Carga axial en los tirantes 3, 7, 8 y 14 con el espectro de en el eje Y

En la tabla 4.15 se muestra la variación de la carga axial de los cables de acero de alta resistencia con respecto a los cables de fibra de carbono y fibra de basalto.

Tabla 4. 15 Variación de la carga axial

Variación de la Carga Axial en el eje X				
Tirante	**Acero-Carbono (=R)**	**Acero-Carbono (=K)**	**Acero-Basalto (=R)**	**Acero-Basalto (=K)**
3	6%	3%	5%	18%
7	14%	23%	22%	7%
8	11%	26%	29%	9%
14	2%	9%	9%	7%

Variación de la Carga Axial en el eje Y				
Tirante	**Acero-Carbono (=R)**	**Acero-Carbono (=K)**	**Acero-Basalto (=R)**	**Acero-Basalto (=K)**
3	17%	10%	18%	36%
7	16%	10%	11%	4%
8	7%	17%	36%	49%
14	2%	2%	2%	5%

Valores obtenidos a partir del espectro de respuesta correspondiente al municipio de Manzanillo

4.3 ANÁLISIS NO LINEAL

El análisis dinámico no lineal más empleado es el cálculo paso a paso utilizando acelerogramas, que pueden corresponder a sismos reales con un registro histórico o sismos generados artificialmente (Bozzo & Barbat, 2004). Un acelerograma es una representación temporal o cronológica de la aceleración del suelo registrado durante un sismo. Debido a que la aceleración es muy irregular en el tiempo, los datos se registran en intervalos pequeños de tiempo, utilizándose generalmente desde 0.01 a 0.1 segundos, según se requiera. Los acelerogramas son irregulares, presentando generalmente amplitudes iniciales pequeñas, las cuales crecen rápidamente hasta alcanzar los valores máximos, para descender igualmente rápido hasta que el movimiento se detiene.

Se usó el programa PRODISIS para obtener los acelerogramas sintéticos generados en los municipios de Manzanillo, Lázaro Cárdenas y Acapulco, los cuales presentaron los valores más altos de desplazamiento, momento flexionante y carga axial (figura 4.23).

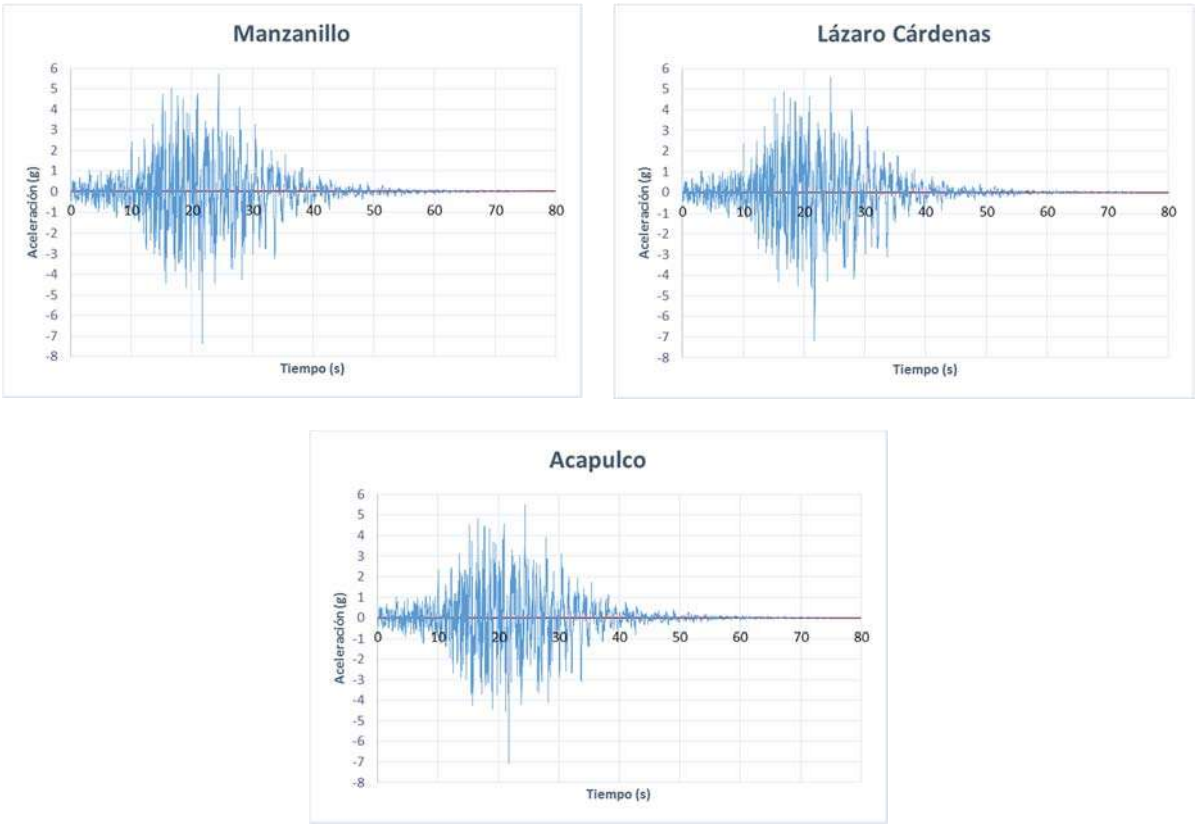


Figura 4. 23 Acelerogramas de los municipios de Manzanillo, Lázaro Cárdenas y Acapulco

En la figura 4.24 se muestran los espectros de respuesta asociados a los municipios mencionados anteriormente. Los registros de aceleración tienen tres direcciones perpendiculares; dos horizontales y una vertical. Para este análisis se usaron únicamente los valores correspondientes a las componentes horizontales X y Y.

Es importante resaltar que los espectros son muy semejantes en cuanto a su forma y distribución para todo el intervalo de periodos, a pesar de que las magnitudes si cambian de manera considerable. Por ejemplo, el espectro que corresponde al registro de Manzanillo alcanza valores máximos de 1.42 g, mientras que el de Hermosillo, sólo alcanza una ordenada ligeramente superior a 0.3 g.

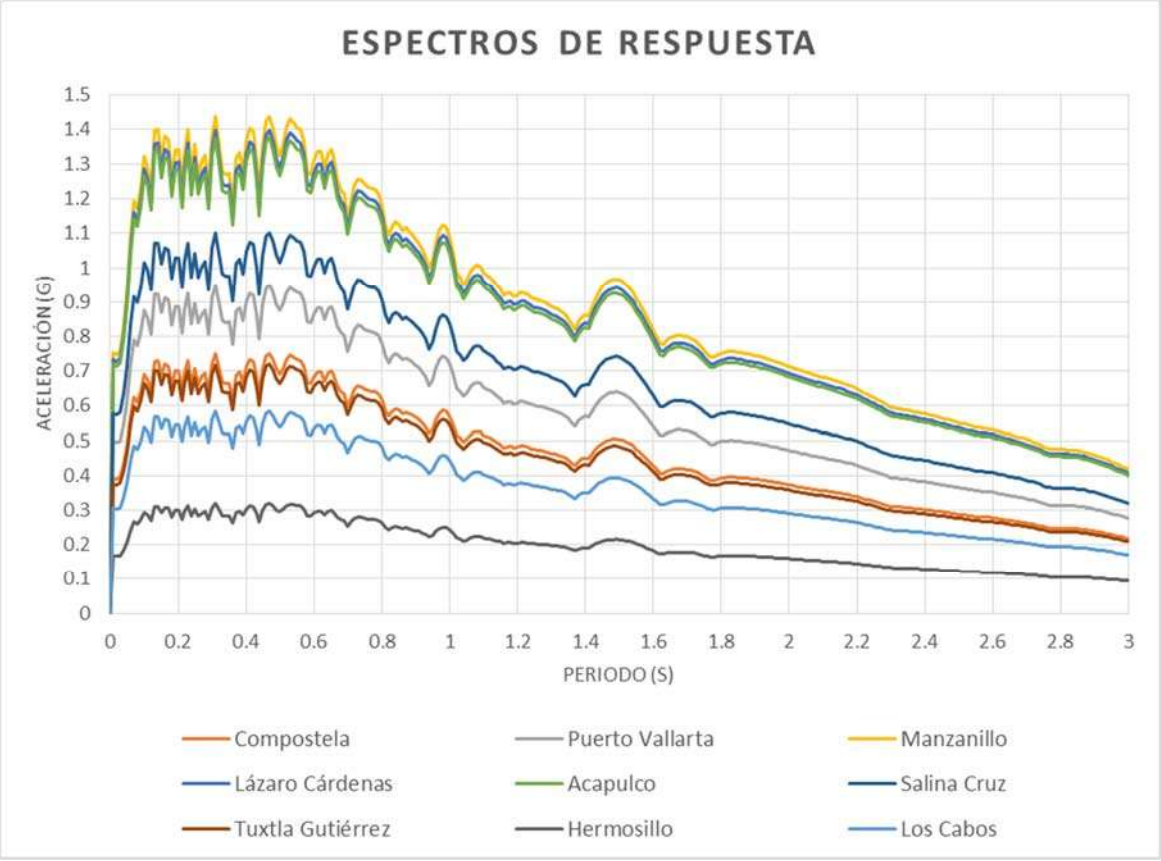


Figura 4. 24 Espectros de respuesta

4.3.1 RESPUESTA DEL TABLERO

Para evaluar la respuesta del tablero con distintos tipos de cable, se estudian los siguientes parámetros: momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas axiales sobre las trabes longitudinales, desplazamientos verticales al centro del claro principal y en la parte superior de las pilas, tensiones en los tirantes y los elementos mecánicos en la base de las pilas.

Desplazamientos verticales

Al analizar el puente con cables de acero de alta resistencia con los espectros de diseño, se obtuvieron desplazamientos verticales en el centro del claro principal de gran magnitud. El puente con cables de acero de alta resistencia presenta un desplazamiento de 1.17 m, con el acelerograma correspondiente al estado de Guerrero. Al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de basalto igualando las resistencias, se obtiene un desplazamiento de .91 m, lo cual representa una variación del 21%. La variación con respecto a los demás arreglos en los cables es menor al 7%. En la tabla 4.16 de muestran los desplazamientos máximos.

Tabla 4. 16 Desplazamientos máximos

Materiales	Desplazamiento con acelerograma en el eje X	Desplazamiento con acelerograma en el eje Y
Acero de Alta Resistencia	0.83	1.17
Fibras de Carbono (=R)	0.13	0.91
Fibras de Carbono (=K)	0.60	1.09
Fibras de Basalto (=R)	0.40	1.12
Fibras de Basalto (=K)	0.59	1.16

Valores obtenidos a partir de la envolvente de desplazamientos (m)

Momentos longitudinales

El análisis con registros de acelerogramas o análisis en el tiempo se realizó con un intervalo de tiempo de 0.1 s, con un número de pasos de 400, por lo que se tienen 40 segundos de análisis. Al usar la envolvente de momentos, se obtienen los valores máximos y mínimos en cada elemento que conforma la estructura. El momento máximo se presenta al inicio de los claros de compensación, aunque se presentan momentos importantes al centro del claro principal, sin diferencias notables entre el eje X y el eje Y (figura 4.25). Los valores más altos se presentan con el registro correspondiente al municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

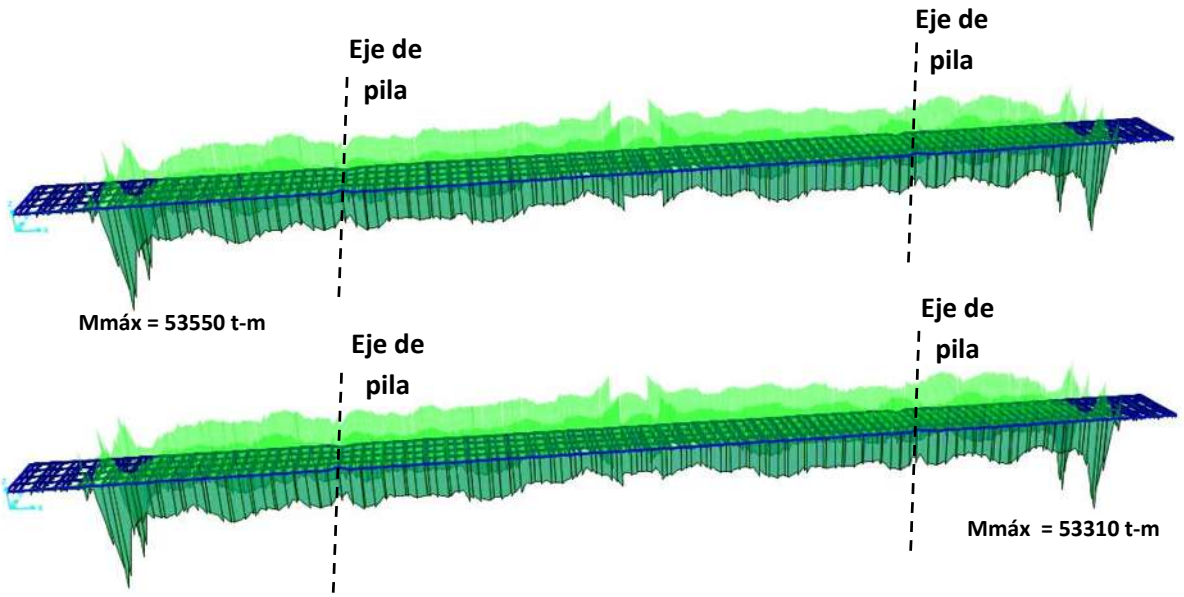


Figura 4. 25 Envolvente de los diagramas de momentos del puente con cables de acero de alta resistencia. Registro con acelerogramas en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

La distribución de los momentos a lo largo del eje longitudinal del puente no se modifica al cambiar los tipos de cables, únicamente presentan variaciones en su magnitud. Las diferencias en los diagramas de momentos que se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de carbono o basalto bajo el criterio de igual rigidez con los registros en el eje X y en el eje Y son de poca magnitud (12% y 8% respectivamente). Al igualar las resistencias, la diferencia con cables de fibras de basalto se incrementa un 38% en el eje X, mientras que los registros en el eje Y presentan una variación del 39% (figura 4.26). Los valores de los momentos máximos se muestran en la tabla 4.17.

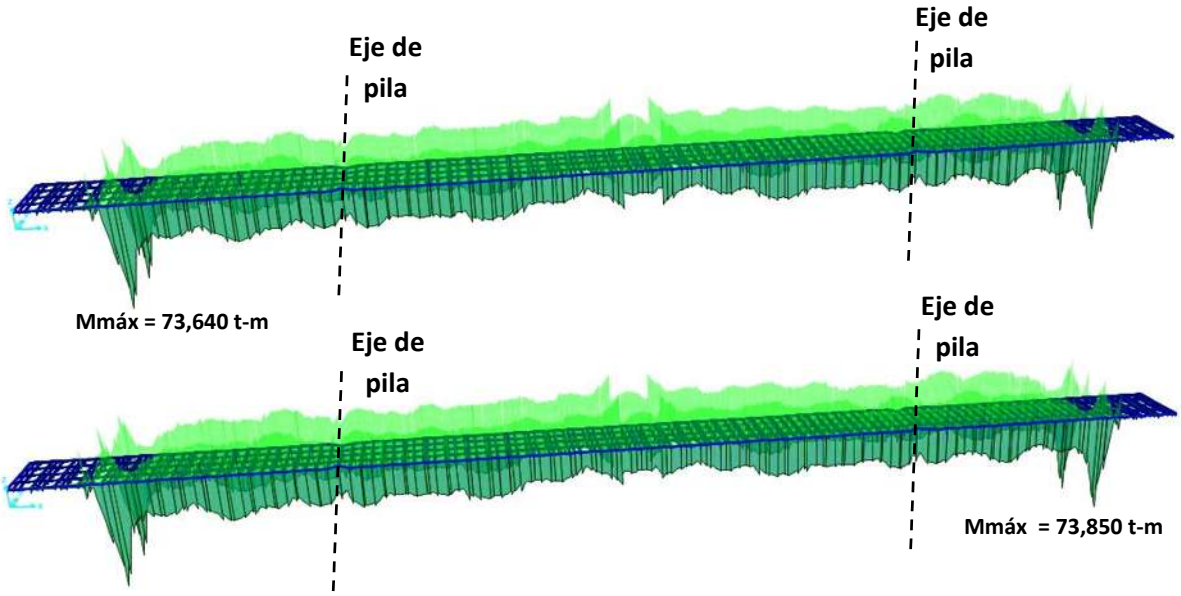


Figura 4. 26 Envolvente de los diagramas de momentos del puente con cables de basalto (=R). Registro con acelerogramas en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

Tabla 4. 17 Momentos máximos

Materiales	Momento en X (t-m)	Mmáx/MmáxAcero	Momento en Y (t-m)	Mmáx/MmáxAcero
Acero de Alta Resistencia	53550	1	53310	1
Fibras de Carbono (=R)	63080	1.18	63150	1.18
Fibras de Carbono (=K)	46930	0.88	47030	0.88
Fibras de Basalto (=R)	73640	1.38	73850	1.39
Fibras de Basalto (=K)	49160	0.92	48900	0.92

Valores correspondientes al registro de Lázaro Cárdenas, Michoacán

Fuerza axial en trabes longitudinales

La fuerza axial máxima en el puente con cables de acero de alta resistencia, usando el acelerograma del estado de Colima en el eje X, se presenta al inicio de los claros de compensación, aunque al centro del claro principal también se presentan valores de gran magnitud. De igual manera, para el acelerograma en el eje Y, los valores máximos se presentan al inicio de los claros de compensación, y donde se presenta una disminución considerable en magnitud en la zona de las pilas (figura 4.27). Los valores más altos se presentan con el registro correspondiente al municipio de Manzanillo, Colima.

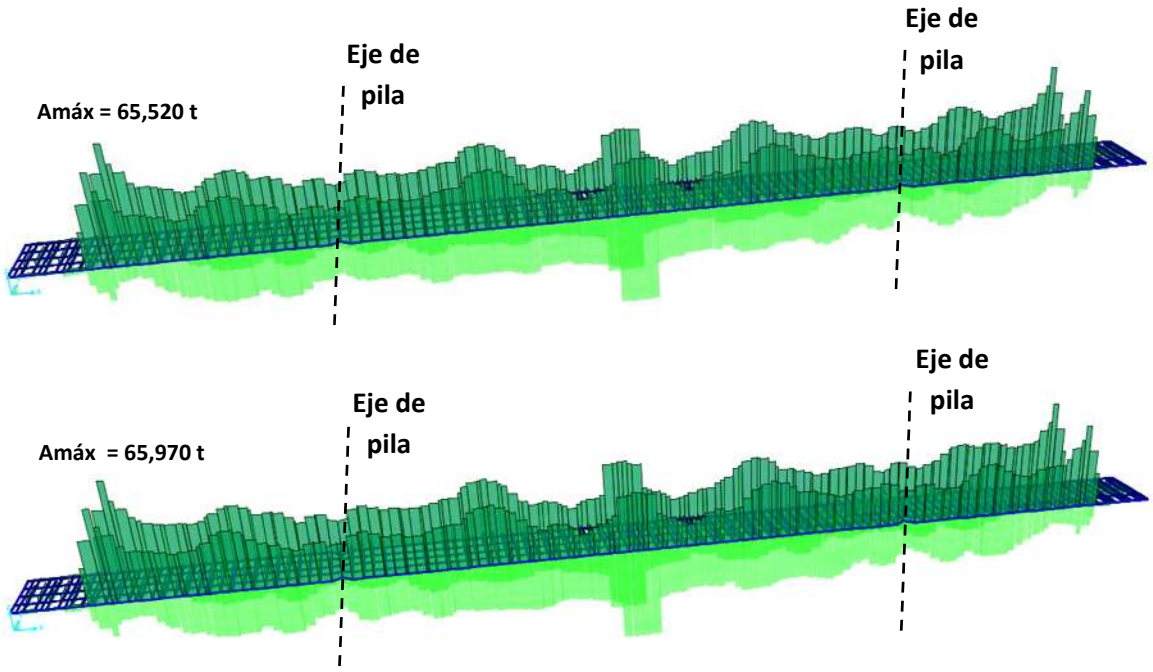


Figura 4. 27 Envolvente de los diagramas de carga axial del puente con cables de acero de alta resistencia. Registro con acelerogramas en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

Las diferencias que se observan en los diagramas de fuerza axial del puente con cables de acero de alta resistencia con respecto a los otros tipos de cable se muestran en la tabla 4.18. Al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra carbono y basalto, se obtienen resultados muy variados. Las diferencias más grandes se obtienen al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de basalto mediante la igualación de resistencias, con una variación del 54% en el eje X y un 52% en el eje Y (figura 4.28).

Tabla 4. 18 Carga axial máxima

Materiales	Axial en X (t)	Amáx/AmáxAcero	Axial en Y (t)	Amáx/AmáxAcero
Acero de Alta Resistencia	65520	1	65970	1
Fibras de Carbono (=R)	78940	1.20	78730	1.19
Fibras de Carbono (=K)	66510	1.02	66570	1.01
Fibras de Basalto (=R)	100800	1.54	100500	1.52
Fibras de Basalto (=K)	64090	0.98	64340	0.98

Valores correspondientes al registro de Manzanillo, Colima

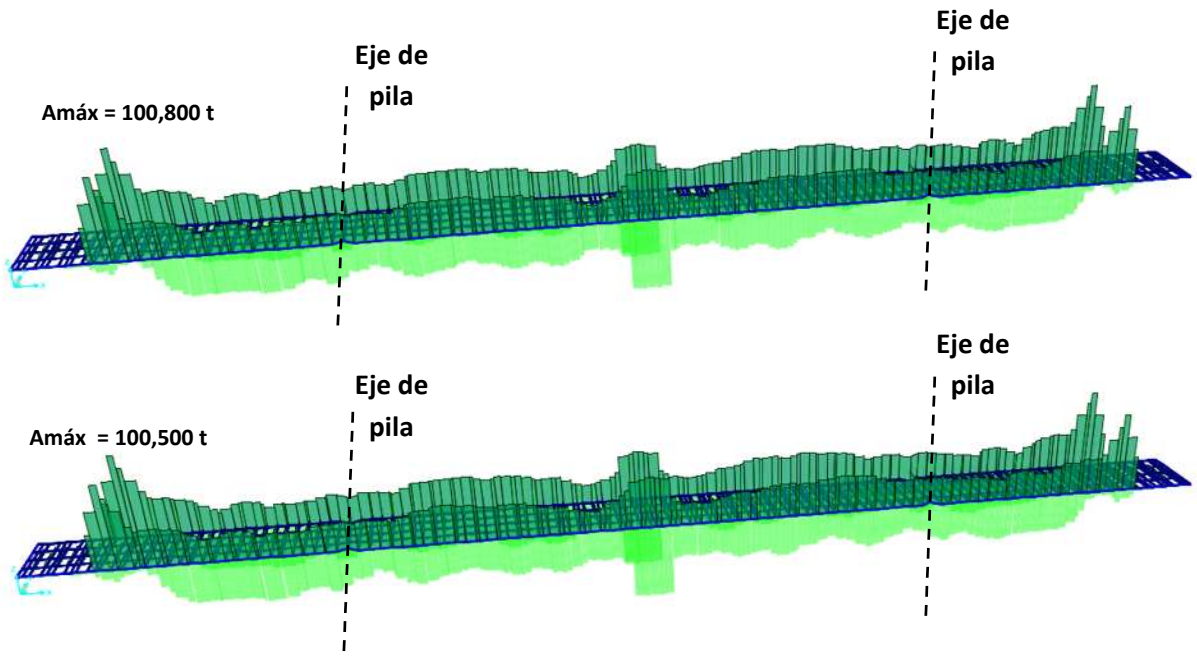


Figura 4. 28 Envolvente de los diagramas de carga axial del puente con cables de fibra de basalto (=R). Registro con acelerogramas en el eje X (arriba) y en el eje Y (abajo)

4.3.2 RESPUESTA DE LAS PILAS

Mediante los acelerogramas se obtuvieron los desplazamientos máximos en el extremo superior de las pilas, los cuales se tratan de evitar para la condición de carga permanente del puente. A continuación, se describen los desplazamientos y elementos mecánicos en las pilas para los distintos tipos de cables utilizando los acelerogramas generados en los municipios de Manzanillo, Lázaro Cárdenas y Acapulco, correspondientes a los estados de Colima, Michoacán y Guerreo respectivamente, los cuales presentan las respuestas más altas.

Desplazamientos longitudinales

Al analizar el puente con cables de acero de alta resistencia con los acelerogramas, se obtuvieron los desplazamientos máximos para cada una de sus componentes horizontales (X y Y) en el extremo superior de las pilas. Los desplazamientos más importantes ocurren con el acelerograma correspondiente al estado de Guerrero.

El desplazamiento más significativo en el eje X es de 6.61 m, al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono igualando las resistencias. Para el eje Y, el desplazamiento más importante es de 1.98 m, y ocurre al sustituir los cables de acero por cables de fibra de basalto igualando las resistencias. Los valores de desplazamiento máximo para los cinco tipos de cable se muestran en la tabla 4.19.

Tabla 4. 19 Desplazamientos máximos

Materiales	Desplazamiento con acelerograma en el eje X	Desplazamiento con acelerograma en el eje Y
Acero de Alta Resistencia	0.33	1.85
Fibras de Carbono (=R)	1.29	2.74
Fibras de Carbono (=K)	0.08	1.81
Fibras de Basalto (=R)	1.85	2.38
Fibras de Basalto (=K)	0.00	1.81

Los valores se obtuvieron de la pila #4

Momentos flexionantes transversales

Las pilas del puente con cables de acero presentan valores de magnitud importante debido a la envolvente de momentos con el acelerograma correspondiente al municipio de Lázaro Cárdenas, presentándose el momento máximo negativo en la base de las pilas, así como momentos importantes en la zona media de estas (figura 4.29).

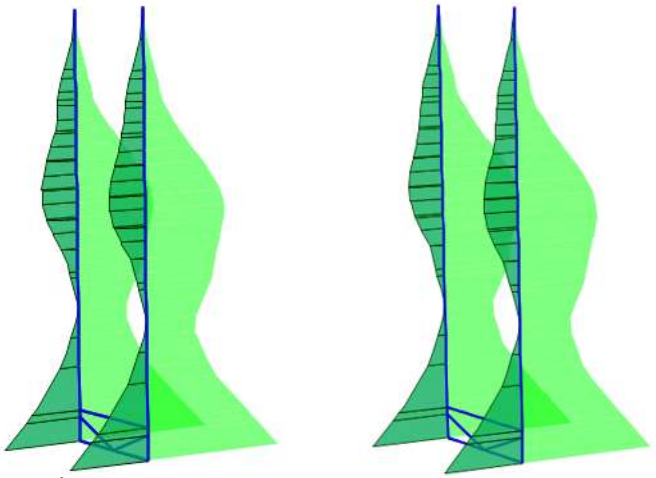


Figura 4. 29 Envolvente de los diagramas de momentos con acelerograma del municipio de Lázaro Cárdenas en el eje X (a) y en el eje Y (b)

Las diferencias obtenidas en los diagramas de momentos utilizando el acelerograma generado para el municipio de Lázaro Cárdenas, aplicando el criterio de igual rigidez son del 13% en el eje X para las fibras de basalto, mientras que, para las fibras de carbono al igualar las resistencias, la diferencia es de un 17% en el eje Y.

Tabla 4. 20 Momentos máximos

Materiales	Momento en X (t-m)	Mmáx/MmáxAcero	Momento en Y (t-m)	Mmáx/MmáxAcero
Acero de Alta Resistencia	241516.2	1	238783.6	1
Fibras de Carbono (=R)	214389.9	0.89	197480.8	0.83
Fibras de Carbono (=K)	245989.6	1.02	243097.6	1.02
Fibras de Basalto (=R)	213896.0	0.89	208510.9	0.87
Fibras de Basalto (=K)	208928.8	0.87	208741.1	0.87

Valores correspondientes al registro de Lázaro Cárdenas, Michoacán

Fuerza axial en las pilas

La carga axial máxima en el puente con cables de acero de alta resistencia se presenta en la base de las pilas tanto en el eje X como en el eje Y, mientras que va disminuyendo conforme se alcanza el punto más alto de la pila como se muestra en la figura 4.30. Las cargas axiales máximas se presentan con el acelerograma generado en Manzanillo, Colima, y se muestran en la tabla 4.21. Al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono o basalto mediante la igualación de rigideces, las diferencias son de magnitud considerable (40% y 26% respectivamente) en el eje X como en el eje Y. La mayor diferencia ocurre al sustituir los cables de acero por cables de fibra de basalto mediante la igualación de resistencias, con un 49% tanto en el eje X como en el eje Y (figura 4.31).

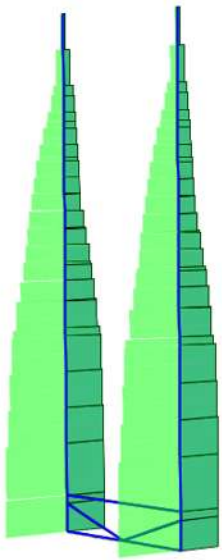


Figura 4. 30 Envolvente del diagrama de carga axial con acelerograma del estado de Colima

Tabla 4. 21 Carga axial máxima

Materiales	Axial en X (t)	Amáx/AmáxAcero	Axial en Y (t)	Amáx/AmáxAcero
Acero de Alta Resistencia	97043.5	1	97140.3	1
Fibras de Carbono (=R)	71221.5	0.73	71112.1	0.73
Fibras de Carbono (=K)	58670.3	0.60	58581.3	0.60
Fibras de Basalto (=R)	49531.2	0.51	49546.5	0.51
Fibras de Basalto (=K)	72159.1	0.74	72147.8	0.74

Valores correspondientes al registro de Manzanillo, Colima

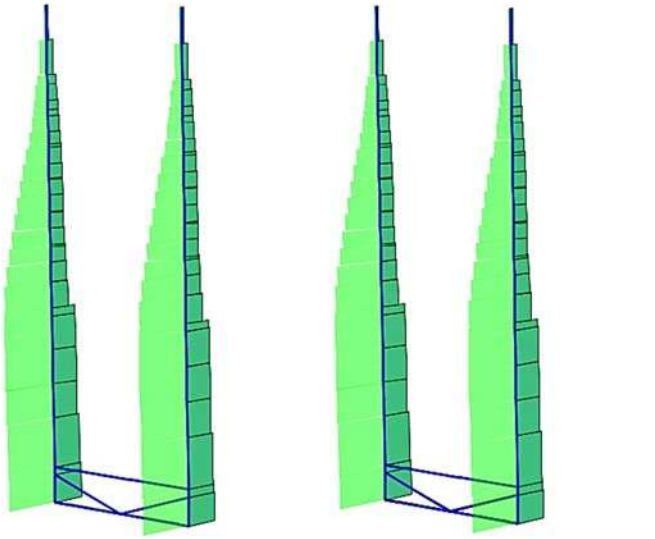


Figura 4. 29 Envolvente del diagrama de carga axial con acelerograma del municipio de Manzanillo, Colima en el eje X (a) y en el eje Y (b)

4.2.3 RESPUESTA DE LOS CABLES

Los cables de acero de alta resistencia, así como los de carbono y basalto fueron analizados con los acelerogramas correspondientes a los estados de Baja California Sur, Chiapas, Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca y Sonora. Se analizaron los 112 cables que conforman el puente, y se eligieron los tirantes 3, 7, 8 y 14 ya que presentan la carga axial más alta, y a su vez, las cargas axiales más importantes se dieron con los acelerogramas correspondientes a los estados de Colima, Guerrero y Michoacán, como se muestra en la tabla 4.22. Como se puede apreciar en la tabla anterior, los valores de carga axial no presentan una variación significativa.

Tabla 4. 22 Carga axial máxima (t)

ACELEROGRAMA EN EL EJE X				
ESTADOS	**TIRANTE 3**	**TIRANTE 7**	**TIANTE 8**	**TIRANTE 14**
COLIMA	4000	4000	4028	5000
GUERRERO	4000	4000	4028	5000
MICHOACAN	4000	4000	4028	5000
ACELEROGRAMA EN EL EJE Y				
ESTADOS	**TIRANTE 3**	**TIRANTE 7**	**TIANTE 8**	**TIRANTE 14**
COLIMA	4000	4000	4025	5002
GUERRERO	4000	4000	4025	5002
MICHOACAN	4000	4000	4025	5002

Como se observa en la tabla 4.23, al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de basalto mediante la igualación de rigideces, se observa un incremento considerable en la carga axial en el eje X de un 34%, mientras que en el eje Y el incremento es de un 35%, por lo que se puede incrementar la sección transversal del cable hasta encontrar un equilibrio costo-beneficio, ya que las fibras de carbono tienen un costo mayor, lo que limita su uso. Por otra parte, un cable hibrido de fibras de carbono y fibras de basalto también resultaría conveniente.

Tabla 4. 23 Variación de la carga axial

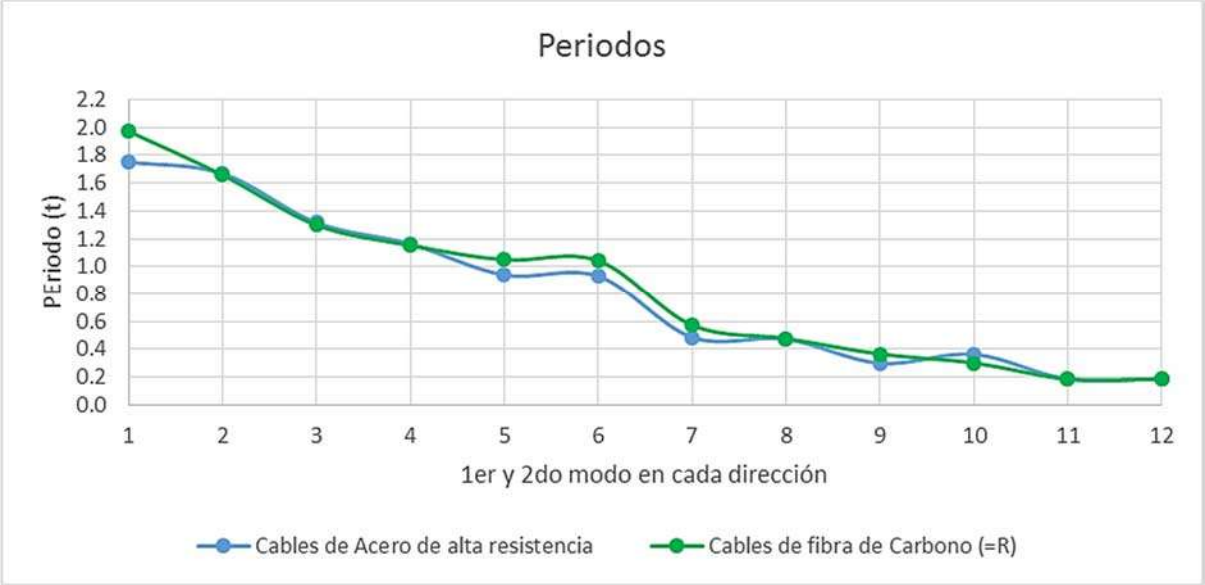
Variación de la Carga Axial en el eje X				
Tirante	**Acero-Carbono (=R)**	**Acero-Carbono (=K)**	**Acero-Basalto (=R)**	**Acero-Basalto (=K)**
3	0%	33%	0%	0%
7	19%	33%	0%	34%
8	13%	31%	0%	25%
14	0%	0%	0%	0%
Variación de la Carga Axial en el eje Y				
Tirante	**Acero-Carbono (=R)**	**Acero-Carbono (=K)**	**Acero-Basalto (=R)**	**Acero-Basalto (=K)**
3	0%	5%	0%	0%
7	19%	34%	0%	35%
8	13%	31%	0%	26%
14	0%	0%	0%	0%

CAPÍTULO 5
ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL

Se determinaron las propiedades dinámicas de cinco puentes, considerando 100 modos de vibrar para obtener el mayor porcentaje de participación de masa de la estructura, el cual fue del 80% para el giro longitudinal en todos los casos, esto es de esperarse dada la gran longitud que tiene el puente, en comparación a su sección transversal. Se observa que en los primeros modos de vibrar, se presentan cantidades de participación de masa importantes, en especial el desplazamiento transversal que alcanza en su primer modo, más del 50% de participación, lo cual ocurre en los cinco puentes. Los primeros y segundos modos en cada una de las direcciones principales de los puentes con fibras de carbono y fibras de basalto, coinciden de manera similar con los modos globales de la estructura en comparación al puente con cables de acero de alta resistencia, por lo que no hay una diferencia significativa al reemplazar los cables de acero por cables de otros materiales.

Al comparar los periodos, la mayor diferencia se presenta entre el puente con cables de acero de alta resistencia y los puentes con cables de fibra de carbono y fibra de basalto al igualar las resistencias. En la figura 5.1 se puede observar la variación de los periodos en las principales direcciones del puente, es decir, desplazamientos longitudinales, transversales y verticales, además de los giros alrededor de los ejes longitudinal, transversal y vertical. El periodo depende tanto de la rigidez como de la distribución de las masas en la estructura, por lo que es de esperar, que al reducir la sección transversal de los cables, dichas propiedades cambien, aunque de manera poco significativa. A medida que la cantidad de análisis de modos de vibrar se incrementa, menor es la participación de masa en cada modo, hasta llegar al punto en que la cantidad de participación en comparación a las anteriores es mínima.



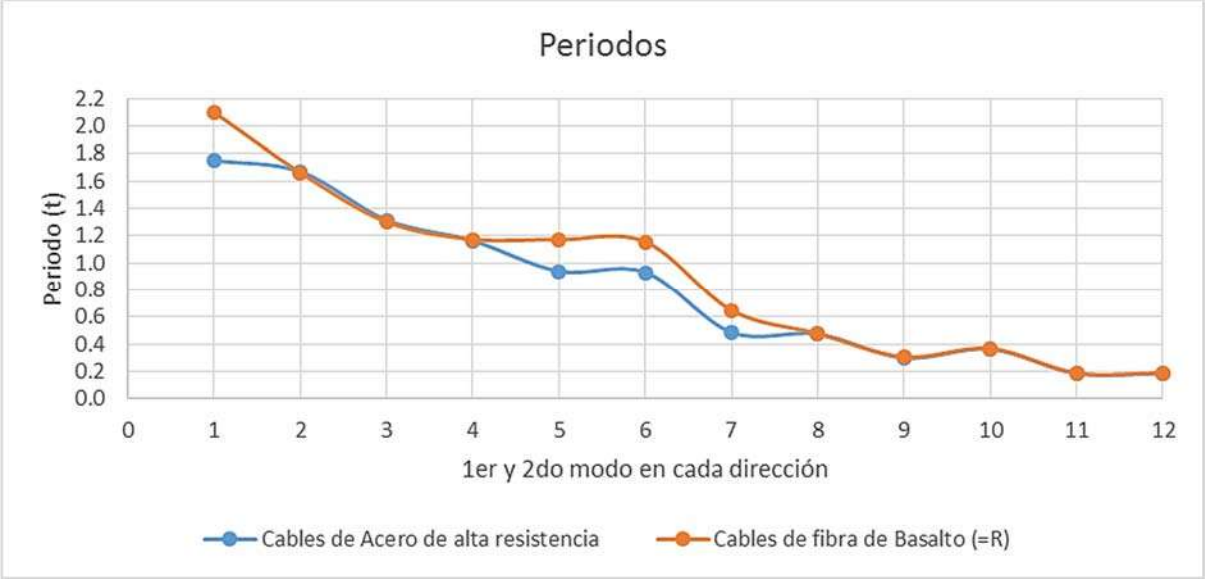
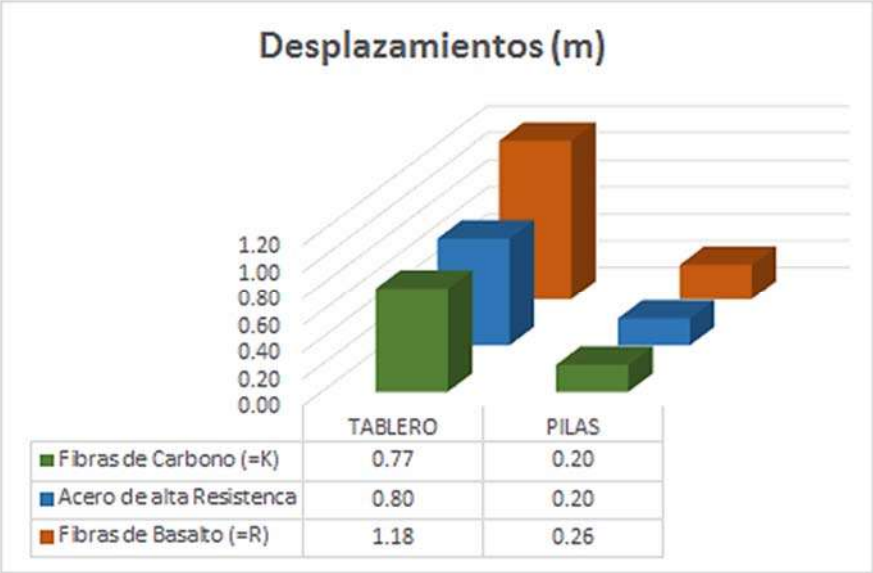


Figura 5. 1 Periodos de los dos primeros modos en cada dirección cuando se usan cables de acero de alta resistencia y fibras de carbono (arriba) y fibras de basalto (abajo)

5.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS BAJO CARGA PERMANENTE

5.2.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 5.2, se muestran los desplazamientos al centro del claro principal y en el punto más alto de las pilas. El puente con cables de fibra de carbono presenta el menor desplazamiento, mientras que el puente con cables de basalto presenta el desplazamiento máximo. El desplazamiento vertical del puente con cables de acero de alta resistencia al centro del claro principal es de 0.80 m, por lo que las diferencias respecto a las fibras de carbono y basalto son del 4 y 48% respectivamente. El desplazamiento longitudinal del puente con cables de acero de alta resistencia en las pilas es de 0.20 m, mientras que el desplazamiento con los cables de fibra de basalto es de 0.26 m, un incremento del 30%.



	TABLERO	PILAS
Fibras de Carbono (=K)	0.77	0.20
Acero de alta Resistenca	0.80	0.20
Fibras de Basalto (=R)	1.18	0.26

Figura 5. 2 Desplazamientos en el centro del tablero y en las pilas

5.2.2 ANÁLISIS DEL TABLERO

Cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibras de basalto mediante la igualación de rigideces, el momento positivo y negativo se reducen un 7 y 2% respectivamente (figura 5.3). Por otro lado, la carga axial positiva disminuye un 10% cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por fibras de carbono, mientras que la carga axial negativa es menor con los cables de acero de alta resistencia (figura 5.4).

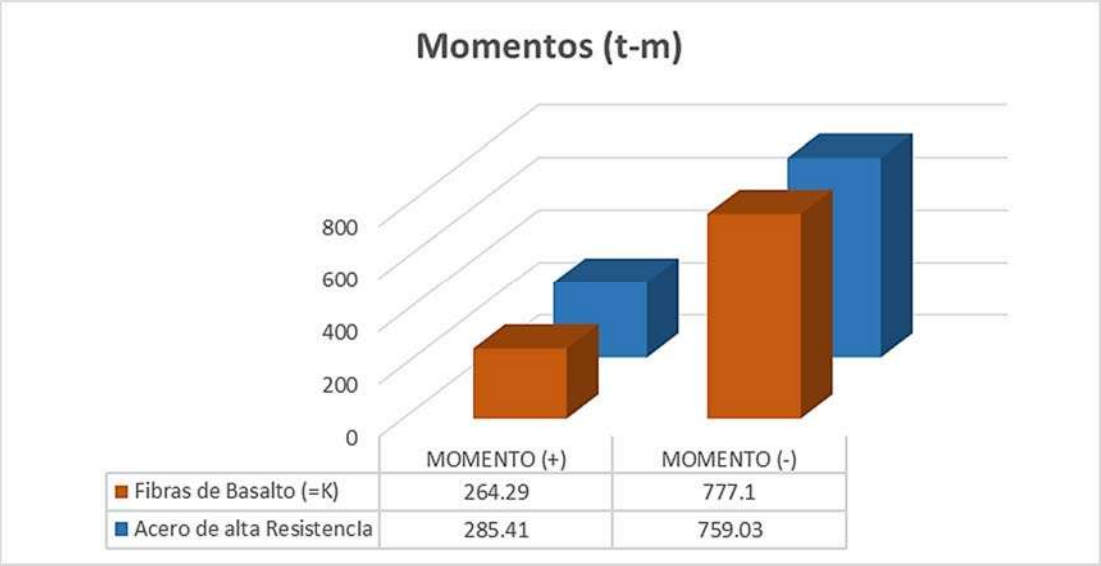


Figura 5. 3 Momentos en el tablero

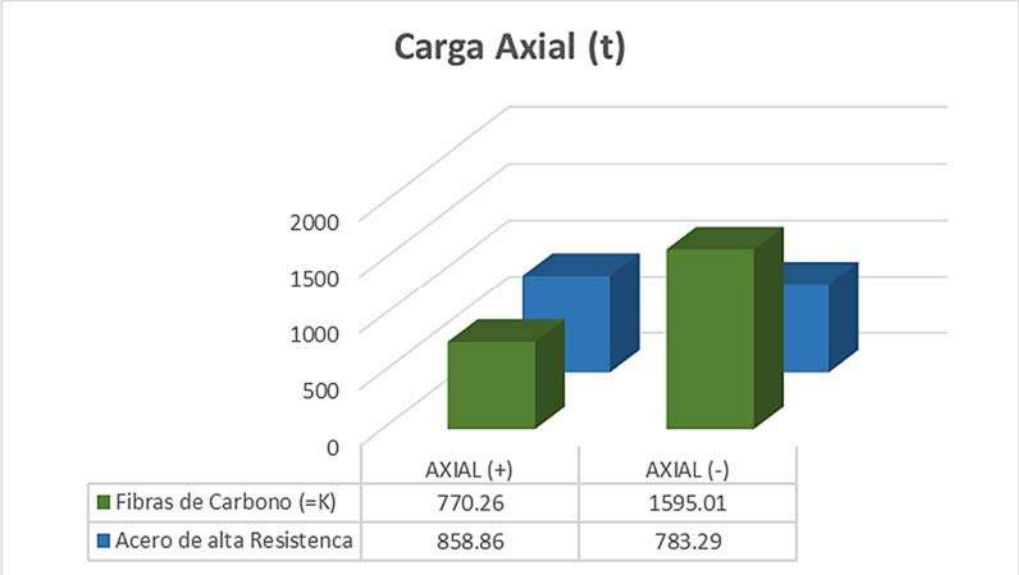


Figura 5. 4 Carga axial en el tablero

5.2.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS

Cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibras de basalto, el momento longitudinal disminuye un 4% (figura 5.5). Por otro lado, la carga axial disminuye un 5% cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibras de basalto (figura 5.6).

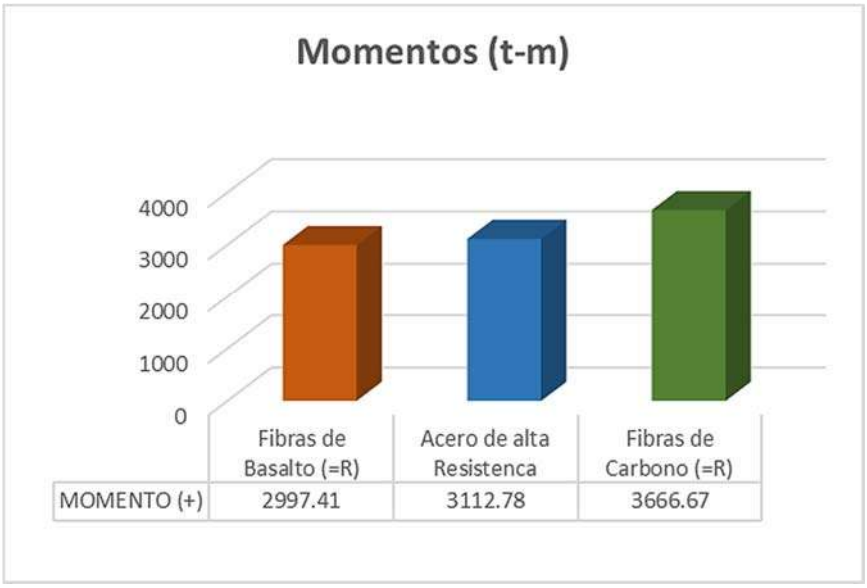


Figura 5. 5 Momentos en las pilas

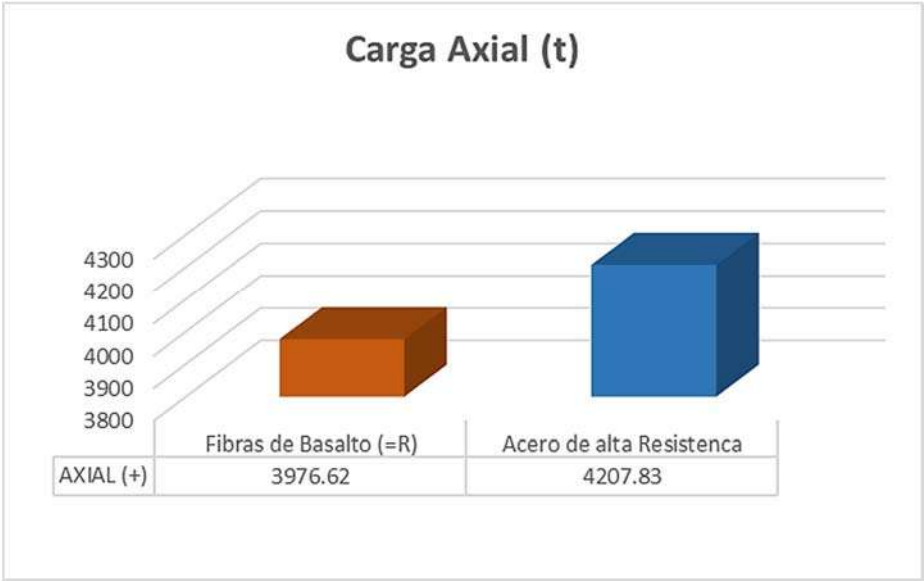


Figura 5. 6 Carga axial en las pilas

5.2.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES

Los cables de acero de alta resistencia presentan los valores más altos de carga axial (figura 5.7). Cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibras de basalto, la carga axial en los cables 3, 7, 8 y 14 disminuyen un 24, 30, 32 y 23% respectivamente. Con el criterio de igualar las resistencias, la sección transversal de los cables disminuyó y con ésta la carga axial, lo que se representa una menor cantidad de material usado y por consiguiente un ahorro económico.

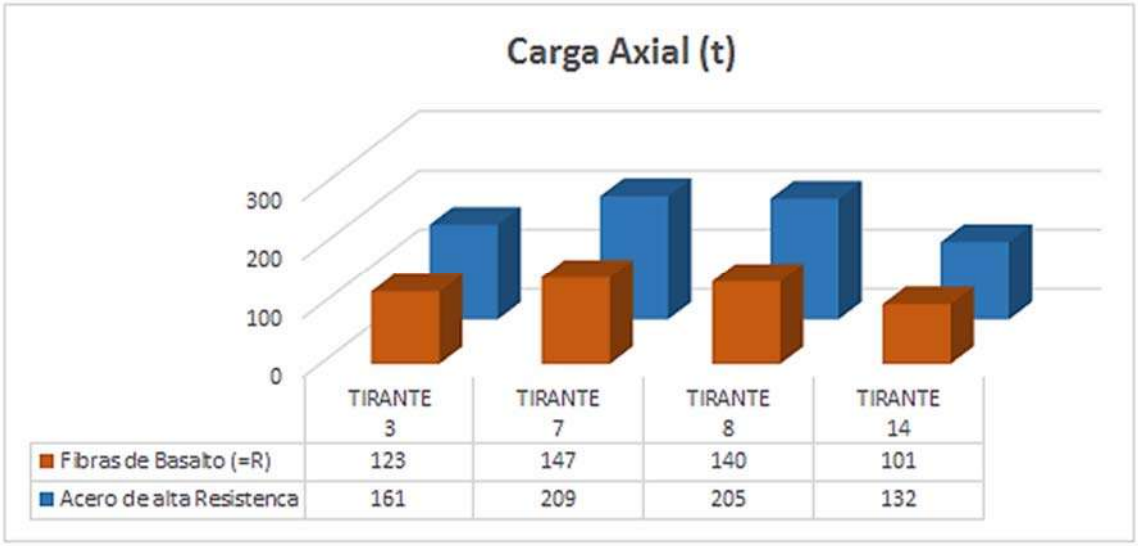


Figura 5. 7 Carga axial en los cables

5.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL

5.3.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 5.8, se observan los desplazamientos en las pilas usando el espectro de diseño en su eje X asociado a Manzanillo, Colima. El puente con cables de acero de alta resistencia tiene el menor desplazamiento en las pilas en comparación con los cables de fibras de carbono y fibras de basalto, con un 33 y 75% menos respetivamente. Los desplazamientos al centro del tablero para el espectro de diseño en su eje X y eje Y son insignificantes.

Figura 5. 8 Desplazamientos con el espectro de diseño en su eje X en las pilas

5.3.2 ANÁLISIS DEL TABLERO

Como se observa en la figura 5.9, el momento máximo positivo con el espectro de diseño asociado al municipio de Manzanillo, Colima, en su eje X se presenta con los cables de acero de alta resistencia, el cual disminuye un 8% cuando se usan los cables de fibra de carbono, mientras que en su eje Y, el momento positivo es prácticamente el mismo con cualquier material. La carga axial máxima positiva se presenta con el espectro de diseño en su eje Y, la cual no tiene diferencia significativa entre los materiales utilizados (figura 5.10).

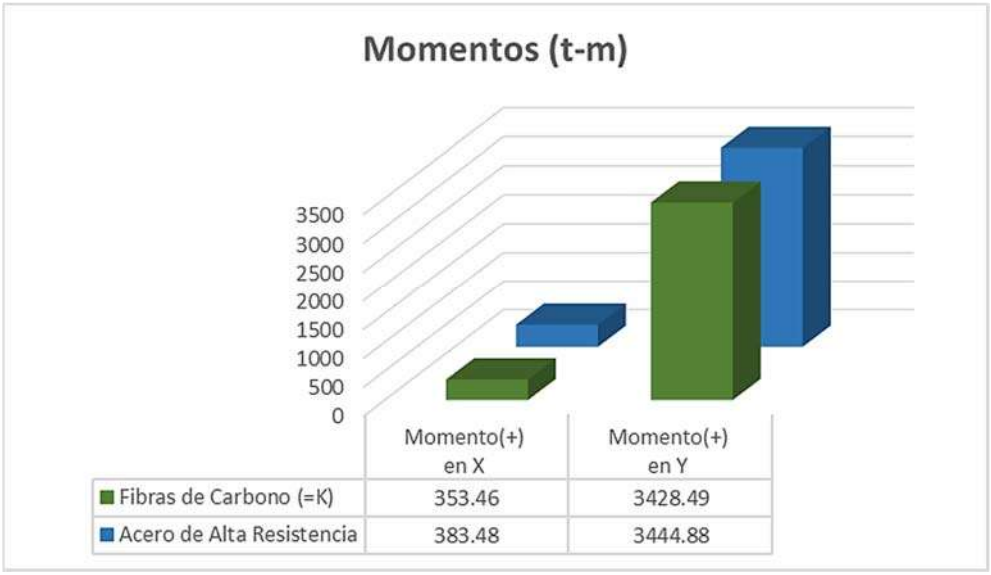


Figura 5. 9 Momentos en el tablero

Figura 5. 10 Carga axial en las pilas

5.3.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS

Como se puede observar en la figura 5.11, al reemplazar los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono, los momentos con el espectro de diseño asociado a Manzanillo, Colima, en su eje X y su eje Y disminuyen poco menos del 3%. Por otro lado, la carga axial presente en las pilas tampoco presenta una variación de gran magnitud, con una diferencia menor al 9% en ambos ejes del espectro (figura 5.12).

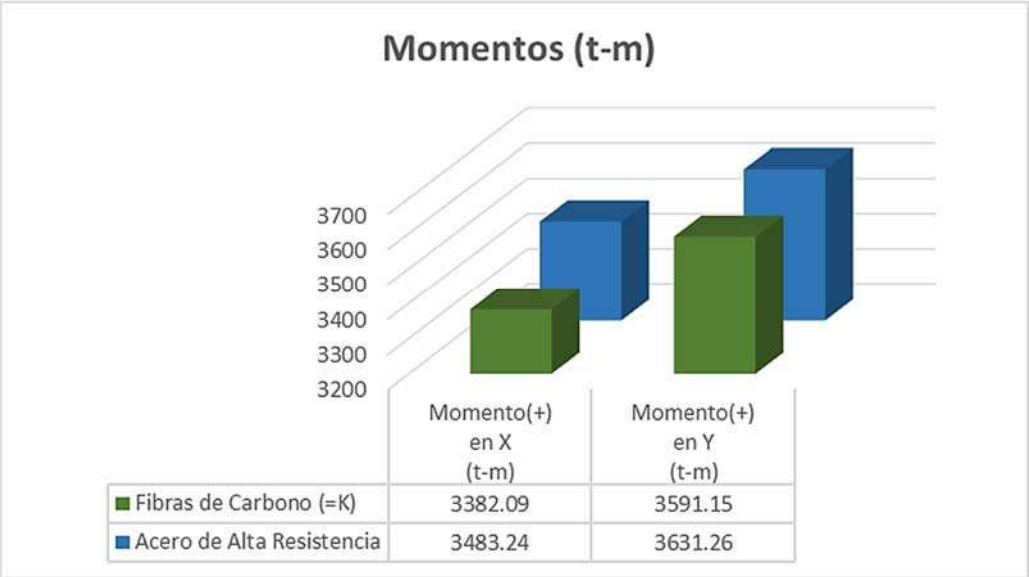


Figura 5. 12 Momentos en las pilas

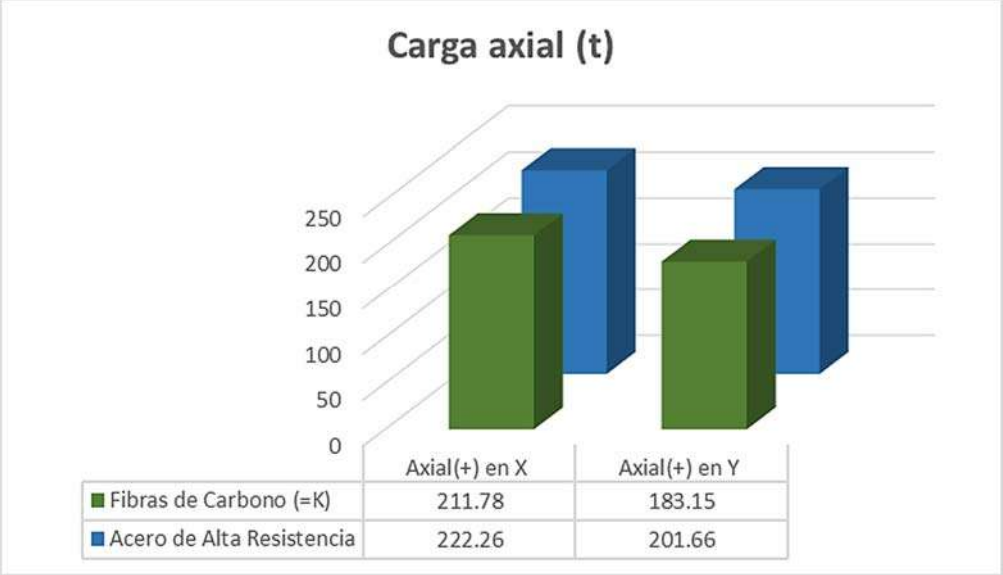
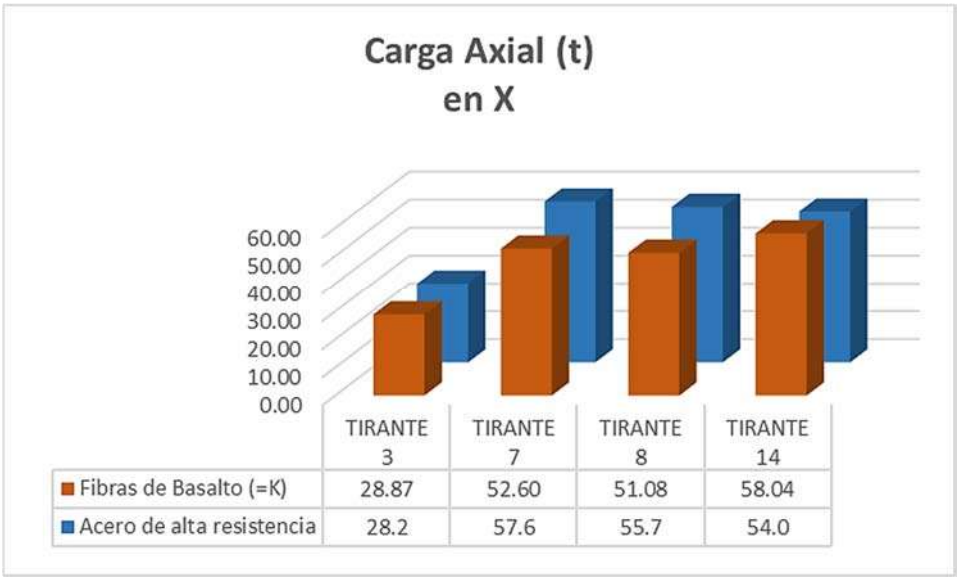


Figura 5. 11 Carga axial en las pilas

5.3.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES

En la figura 5.13 se presentan los valores de carga axial a los que están sujetos los cables. Se usó el espectro de diseño asociado a Manzanillo, Colima, el cual presentó los valores más altos. Usando el espectro de diseño, tanto en su eje X como en su eje Y, la carga axial en los cables de fibra de carbono es ligeramente más alta que en los cables de acero de alta resistencia, con una diferencia menor al 10%, lo que no representa una variación significativa a la hora de elegir un material u otro.



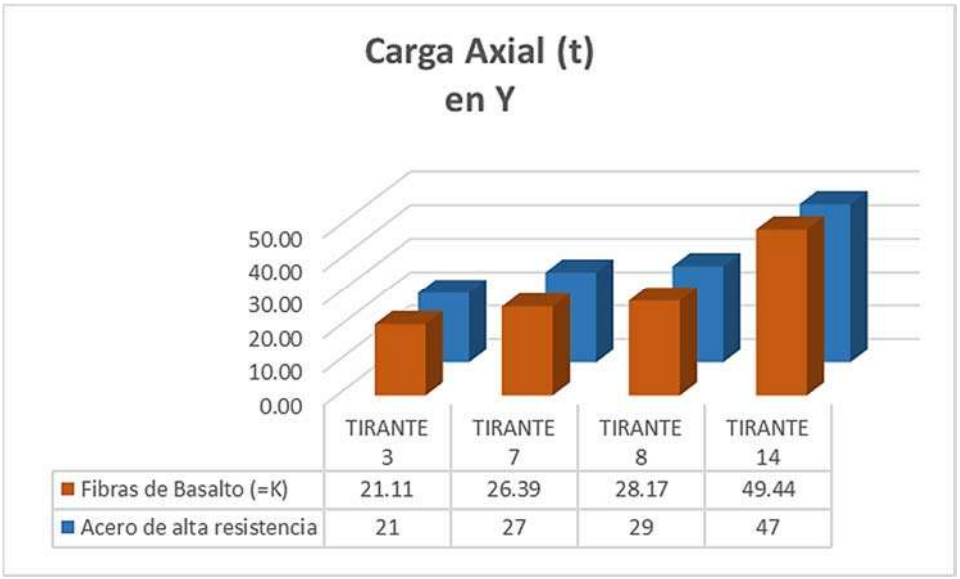


Figura 5. 13 Carga axial en los cables usando el espectro de diseño asociado a Manzanillo, Colima. Espectro de diseño en su eje X (arriba) y en su eje Y (abajo)

5.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS NO LINEAL

5.4.1 DESPLAZAMIENTOS

Como se puede observar en la figura 5.14, el puente con cables de acero de alta resistencia cuando se somete a un análisis no lineal con el acelerograma asociado al municipio de Acapulco, Guerrero (el cual fue el que representó las magnitudes más grandes), tiene un desplazamiento al centro del claro principal de magnitud importante. El desplazamiento disminuye de forma considerable cuando se reemplazan los cables de acero por cables de fibra de carbono, mostrando una diferencia en el espectro de respuesta en su eje X y eje Y del 84 y 22% respectivamente.

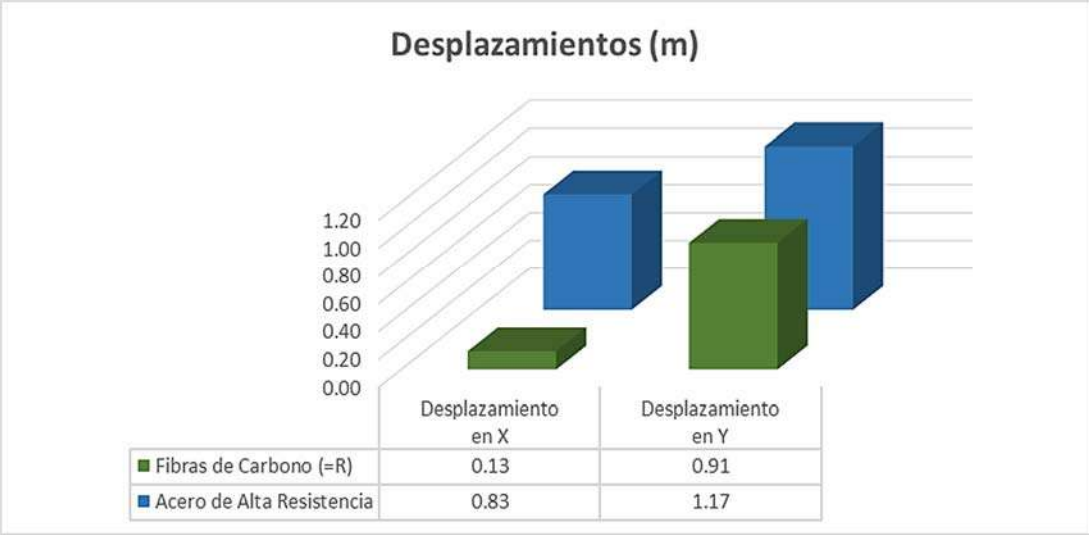


Figura 5. 14 Desplazamientos en el tablero

En la figura 5.15, se puede observar el desplazamiento en las pilas en el eje X del espectro de respuesta asociado al municipio de Acapulco, Guerrero, del puente con cables de acero de alta resistencia, el cual es de 0.33 m, magnitud que se reduce drásticamente al usar cables de fibra de basalto, mientras que en el eje Y, el desplazamiento con cables de acero es de 1.85 m, un 2% mayor que cuando se utilizan los cables de fibra de carbono, lo cual no representa una diferencia de consideración.

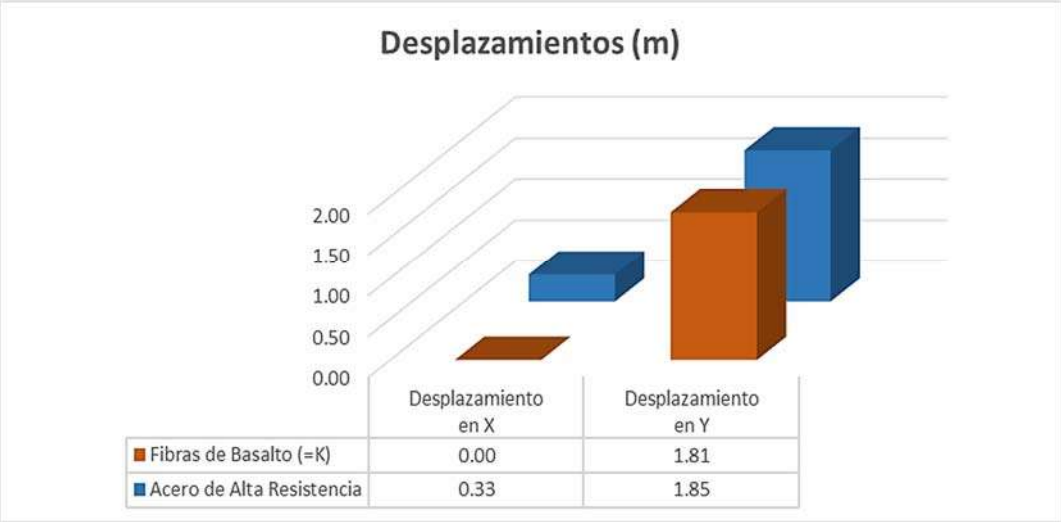
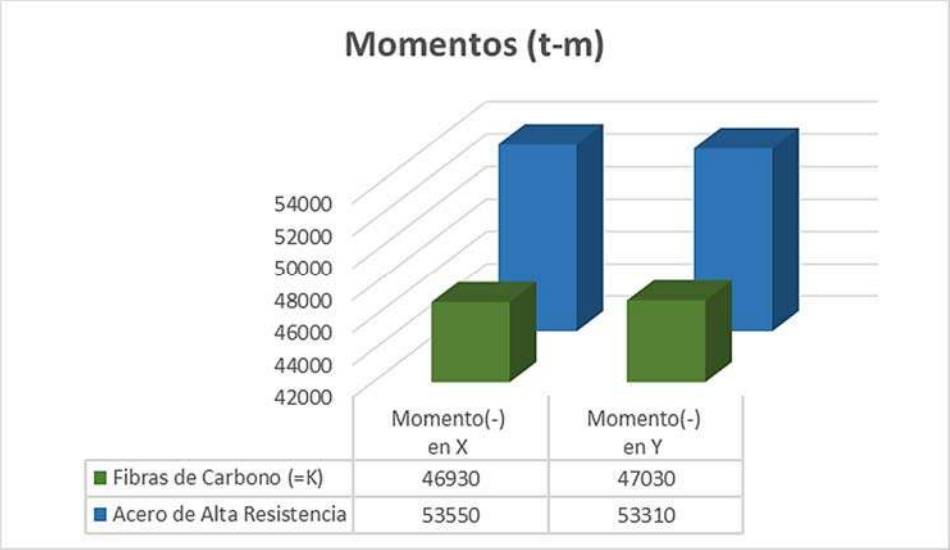


Figura 5. 15 Desplazamientos en las pilas

5.4.2 ANÁLISIS DE DEL TABLERO

En la figura 5.16, se pueden observar los elementos mecánicos presentes en el tablero. En los ejes X y Y del espectro de respuesta asociado a Lázaro Cárdenas, Michoacán, los momentos negativos disminuyen un 12% cuando se reemplazan los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono, de igual forma, la carga axial disminuye un 2% al sustituir el acero de alta resistencia por fibras de basalto an ambos ejes.



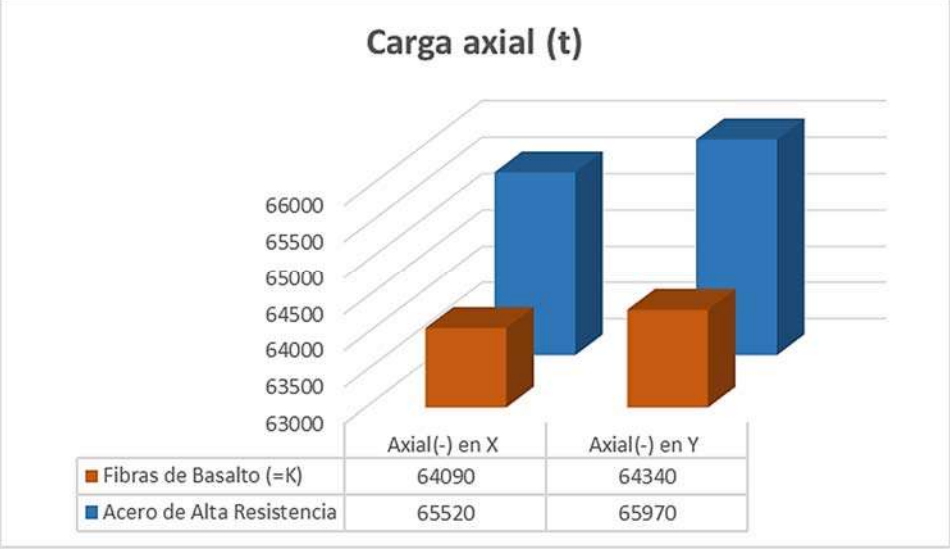
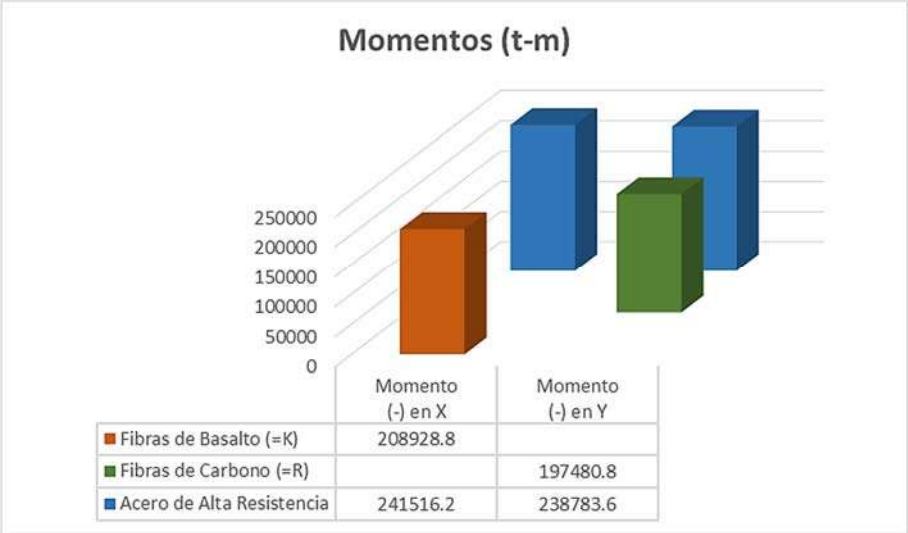


Figura 5. 16 Elementos mecánicos en el tablero

5.4.3 ANÁLISIS DE LAS PILAS

En la figura 5.17, se puede observar los elementos mecánicos en las pilas. Al sustituir los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de basalto se obtiene una disminución del 13% en los momentos longitudinales en el eje X del espectro de respuesta asociado al municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán, mientras que en el eje Y, los momentos disminuyen un 17% cuando actúan los cables de fibra de carbono. La carga axial disminuye hasta un 51% en el eje X y el eje Y del espectro de respuesta asociado a Manzanillo, Colima, cuando se sustituyen los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de basalto.



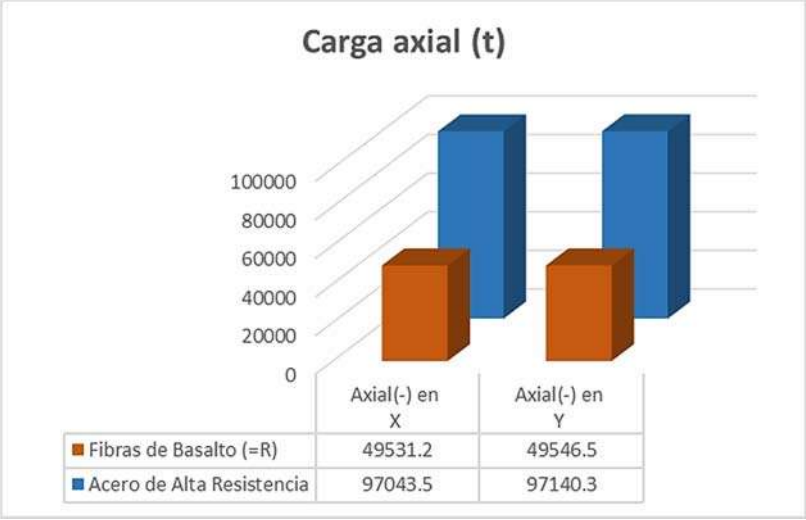


Figura 5. 17 Elementos mecánicos en las pilas

5.4.4 ANÁLISIS DE LOS CABLES

Para el caso del análisis no lineal, los cables prácticamente no presentaron una diferencia al sustituir los cables de acero de alta resistencia por fibras de basalto y/o carbono, por lo que en la figura 5.13 se muestran los valores de la carga axial máxima de los cables 3, 7, 8 y 14, utilizando el acelerograma asociado al municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

El acero de alta resistencia es la opción más utilizada a la hora de elegir un material para los cables de puentes atirantados, sin embargo, cada vez son más los estudios que comprueban las ventajas del uso de materiales alternativos como las fibras de carbono, basalto, vidrio, etc., como reemplazo total o parcial en los cables de puentes. Al reemplazar los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono, se obtiene un menor desplazamiento vertical al centro del claro principal, así como una disminución en la carga axial positiva en el tablero cuando se analiza el puente bajo la condición de carga muerta. Los cables de fibra de carbono también contribuyen a un menor desplazamiento longitudinal en las pilas, así como una disminución de los momentos y carga axial presentes tanto en las pilas como en el tablero, cuando se realizó el análisis modal espectral.

Finalmente, con un análisis no lineal, los cables de fibra de carbono disminuyen drásticamente el desplazamiento vertical en el tablero, así como los momentos negativos en tablero y pilas. Cuando los cables de fibra de basalto actúan en lugar de los cables de acero de alta resistencia bajo la condición de carga muerta, el momento positivo en el tablero y las pilas disminuye, así como la carga axial positiva presente en las pilas y en los cables. La carga axial es ligeramente menor en los cables cuando se analiza con los espectros de diseño. Con el análisis no lineal, el desplazamiento en las pilas se reduce considerablemente al usar cables de fibras de basalto, la carga axial negativa se reduce ligeramente en el tablero, los momentos en las pilas se reducen de forma considerable, mientras que la carga axial presente en las pilas tiene una reducción de prácticamente la mitad en comparación a cuando actúan los cables de acero de alta resistencia. Con el análisis no lineal, la carga axial presente en los cables no presentó una diferencia significativa el reemplazar los cables de acero de alta resistencia por cables de fibra de carbono y/o basalto. Para la geometría y datos específicos de este proyecto, el cual tomó como base el Puente Río Papaloapan, el uso de cables de fibras de carbono y/o basalto mejoran la respuesta del puente, tanto en lo que corresponde a desplazamientos de pilas y tableros como en los elementos mecánicos. A pesar de que las ventajas que presentan los cables de materiales compuestos no son muy grandes, su mayor vida útil debido a sus ventajas ya conocidas como mayor resistencia a la fatiga, propiedades anticorrosivas y mayor resistencia en comparación a su peso, los convierte en una opción atractiva.

A la luz de estos resultados es necesario realizar un estudio costo beneficio, incluyendo las condiciones iniciales y las de largo plazo para establecer las mejores condiciones en cada caso.

BIBLIOGRAFÍA

Abad, W. G. (2013). PUENTES, Obras Maestras de la INGENIERÍA. GUAYAQUIL.

Adanur, S., Günaydin, M., Altunışık, A. C., & Sevim, B. (2013). Comportamiento Dinámico de un Puente Atirantado usando cables CFRP.

Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2004). Diseño sismoresistente de edificios: técnicas convencionales y avanzadas.

Carrión Viramontes, F. J. (2005). Estudio Experimental de un Puente Atirantado.

Carrión Viramontes, F. J. (2006). Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados. Sanfadila, Querétaro.

Construcción Civil. (27 de Noviembre de 2012). Obtenido de https://historiacivil.wordpress.com/2012/11/27/puente-de-coalbrookdale/

El-abd, M. M. (2015). ANALYSIS & DESIGN OF CABLE STAYED BRIDGE.

Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. (3 de Noviembre de 2016). Obtenido de http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20283a.html

Federal, G. O. (2004). NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO. Ciudad de México.

Granja García, A. S., & López Crisanto, J. (2014). ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE NORMA. Coatzacoalcos,.

Historia del puente en España. (1980). En C. F. CASADO.

Lavado, J., & Granados, J. J. (2012). Cálculo de estructuras con el programa SAP2000.

Martija, J. R.-W. (2007). Puente de Brooklyn.

México, E. (30 de Noviembre de 2016). Explorando México. Obtenido de http://www.explorandomexico.com.mx/about-mexico/7/424/

Pérez, R. H. (6 de Enero de 2011). GUADALAJARA DE AYER. Obtenido de http://guadalajaradeayer.blogspot.mx/2011/01/1895-el-puente-de-arcediano-en-la.html

Petyt, M. (2010). Introducción al análisis de vibraciones por elementos finitos.

Samayoa Ochoa, D., Balankin, A., Carrión Viramontes, F. J., & López López, J. A. (2006). ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y. Sanfandila, Qro.

Serquén, A. R. (2010). PUENTES con ASSHTO-LRFD. Perú.

Stadt Köln. (26 de Julio de 2016). Obtenido de http://www.stadt-koeln.de/leben-in-koeln/verkehr/bruecken/die-geschichte-der-koelner-rheinbruecken

Stark, R. (2009). Aplicación del concreto de alta resistencia. Ciudad de México.

Téllez, F. (11 de Enero de 2013). Monterrey, México. Obtenido de http://fermintellez.blogspot.mx/2013/01/el-puente-de-juarez.html

Valdebenito, G. E., & Aparicio, Á. C. (2005). Comportamiento sísmico de puentes atirantados y disipación de energía adicional: Un estado del conocimiento.

Viramontes, F. J. (2005). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PUENTE ATIRANTADO. Sanfandila, Querétaro.

Wikipedia. (2016). Obtenido de https://en.wikipedia.org/wiki/Wycoller

Wu, Z., & Wang, X. (2008). Investigation on a thousand-meter scale cable-stayed bridge with fibre composite cables. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), (pág. 6). Zurich, Switzerland.