

OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE COSTOS DE LOS PUENTES TIPO ARCO
CON CONFIGURACIÓN DE PÉNDOLAS TIPO NETWORK

Roberto Antonio Niño Blanco

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Gustavo Chio Cho

Ingeniero Civil PhD.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2020

Dedicatoria

En agradecimiento a cada uno de los compañeros profesores y amigos que estuvieron juntos en mi camino en la universidad, que me enseñaron tanto cosas buenas tanto como malas, que me han hecho crecer como persona, y tomar mejores decisiones, y sobre todo a mis padres, Olga y Antonio por el apoyo y toda la paciencia que han tenido conmigo a lo largo de estos años, a mi compañera Valentina por la cual fui al congreso en donde me pude enterarme de este tema que me llamó tanto la atención y que me acompañó y me motivo a ser mejor en gran parte de la universidad y a mi compañera Sofia que me ha ayudado a arreglar los errores de la tesis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Optimización y comparación de costos de los puentes tipo arco con configuración de péndolas tipo network.....	16
2.1. Comportamiento de un puente tipo arco con péndolas	16
2.2. Puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen	17
2.3. Puente tipo arco con configuración de péndolas network	18
2.3.1. Ventajas del sistema de configuración de péndolas network.....	19
2.4. Elementos de los puentes arco con péndolas.....	21
2.4.1. El arco	21
2.4.2. Tablero	22
2.5. Ventajas de la tipología del puente arco con péndolas.....	22
3. Análisis y comparación de las configuraciones de péndolas en puentes tipo arco.....	24
3.1. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas rectas.....	26
3.2. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas	29
3.3. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen superior.....	32
3.4. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen inferior	34
3.5. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen-Lohse.....	37

3.6. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network.....	39
3.6.1. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 35°.....	40
3.6.2. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 40°	43
3.6.3. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 45°	45
3.6.4. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 50°	47
4. Comparación de todos los sistemas de péndolas en los puentes tipo arco.....	49
3. Conclusiones.....	52
Referencias Bibliográficas.....	53
Apéndices	10

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Configuración de péndolas vs deformaciones</i>	50
Tabla 2. <i>Configuración de péndolas vs momentos flectores máximo</i>	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Comportamiento estructural de las fuerzas de un puente tipo arco con péndolas rectas</i>	16
Figura 2. <i>Comportamiento estructural de los esfuerzos en un puente tipo arco con péndolas rectas</i>	17
Figura 3. <i>Comportamiento estructural de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas tipo network</i>	19
Figura 4. <i>Relación entre la cantidad de acero y la luz del puente, tomando cada una de las clases de puentes</i>	23
Figura 5. <i>Estructura base del puente arco</i>	25
Figura 6. <i>Sección transversal de las vigas longitudinales del tablero y la sección del arco</i>	25
Figura 7. <i>Sección transversal de las vigas transversales del tablero</i>	26
Figura 8. <i>Sección transversal de las péndolas</i>	26
Figura 9. <i>Deformaciones de un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas</i>	27
Figura 10. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas</i>	28
Figura 11. <i>Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas</i>	28
Figura 12. <i>Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas</i>	29

Figura 13. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas</i>	30
Figura 14. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas</i>	30
Figura 15. <i>Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas</i>	31
Figura 16. <i>Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas</i>	31
Figura 17. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen superior</i>	32
Figura 18. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior</i>	32
Figura 19. <i>Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior</i>	33
Figura 20. <i>Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior</i>	33
Figura 21. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen inferior</i>	34
Figura 22. <i>Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior</i>	35
Figura 23. <i>Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior</i>	35

Figura 24. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior	36
Figura 25. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen-Lohse.....	37
Figura 26. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse.....	37
Figura 27. Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse	38
Figura 28. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse	39
Figura 29. Ángulos de salida de las péndolas en puente arco con configuración de péndolas network.....	40
Figura 30. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 35°	40
Figura 31. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 35°.....	41
Figura 32. Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 35°	41
Figura 33. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 35°	42
Figura 34. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 40°	43

Figura 35. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 40°	43
Figura 36. Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 40°	44
Figura 37. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 40°	44
Figura 38. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 45°	45
Figura 39. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 45°	45
Figura 40. Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 45°	46
Figura 41. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 45°	46
Figura 42. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 50°	47
Figura 43. Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°	48
Figura 44. Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°	48
Figura 45. Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°	49

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Modelos

Resumen

Título: Optimización y comparación de costos de los puentes tipo arco con configuración de péndolas tipo network*

Autor: Roberto Antonio Niño Blanco**

Palabras Clave: Puente, Arco con péndolas, Nielsen, Per Tveit

Descripción: El presente proyecto de grado tiene como finalidad comparar las diversas distribuciones de péndolas en un puente arco, empezando por la tipología de arco con péndolas rectas, y posteriormente con la solución de péndolas inclinadas, siguiendo por la metodología de péndolas en V que el profesor Octavius F. Nielsen en 1926 patentó, y su variante que ha sido utilizada más recientemente, la configuración Nielsen-Lohse que se basa en superponer dos configuraciones tipo Nielsen, y la configuración en red de trabajo, en la cual se hará un análisis para saber cuál ángulo de inclinación en aras tener un menor costo de material.

Dados los resultados de los análisis, se observará que los mejores ángulos para los puentes con péndolas en red de trabajo serán los que están al extremo de sus límites, los ángulos de 35° y 50° , siendo mejor el de 50° , ya que este genera menos fuerzas y momentos flectores en la estructura del puente permitiendo que cuando se haga un análisis de diseño teniendo en cuenta los resultados dados en el presente proyecto de grado se pueda escoger la mejor tipología para reducir el material que se necesitará en el puente reduciendo los costos directos causados por estos descartando sobrecostos que serían innecesarios en la escogencia de la tipología del proyecto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho Ingeniero Civil PhD

Abstract

Title: Optimization and cost comparison of bowstring bridges with network hanger configuration *

Author: Roberto Antonio Niño Blanco**

Key Words: Bridge. Bowstring, Nielsen, Per Tveit

Description: The purpose of this Bachelor Thesis is to compare the various distributions of hangers in an arch bridge, starting with the type of arch with straight hangers, and later with the solution of inclined hangers, following the methodology of V hangers that Professor Octavius F. Nielsen in 1926 patented, and its variant that has been used more recently, the Nielsen-Lohse configuration, which is based on superimposing two Nielsen-type configurations, and to finish the network configuration, in which an analysis will be made to know which angle of inclination in order to have a lower cost of material.

Given the results of the analysis, it will be observed that the best angles for bridges with hangers in network will be those that are at the extreme of their limits, the angles of 35 ° and 50 °, the 50 ° being better, since that this generates less forces and bending moments in the bridge structure allowing that when a design analysis is made taking into account the results given in this degree project, the best typology can be chosen to reduce the material that will be needed in the bridge, reducing the direct costs caused by these, discarding cost overruns that would be unnecessary in the choice of the type of project.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Gustavo Chio Cho Civil Engineer PhD

Introducción

Los puentes, a diferencia de otras estructuras como casas, ductos, tienen muchas formas y variantes, y en ocasiones, se utilizan péndolas como elementos estructurales; tener a disposición un número significativo de opciones hace que su escogencia no sea un proceso sencillo ya que, dependiendo de la solución elegida, se presentan retos propios que se deben superar sin incurrir en sobrecostos.

El presente proyecto de grado va a centrarse en los puentes tipo arco con péndolas de arco inferior realizando un análisis paramétrico donde se compare cómo las distribuciones de péndolas pueden afectar las fuerzas y los momentos flectores que van a ser generados sobre su arco y tablero; este tipo de puente es altamente estático en casos de carga uniformes, pero que presenta algunas dificultades sobre los momentos flectores en el arco y tablero cuando hablamos de las cargas dinámicas, esto se debe a que dependiendo de su distribución, algunas péndolas pueden dejar de funcionar al tener cargas solo en una parte del puente.

Con la finalidad de hacer una comparativa asertiva entre las diferentes distribuciones de péndolas y así poder determinar cómo su ubicación afecta los momentos flectores presentados, se desarrollarán los modelos de péndolas rectas, péndolas inclinadas, péndolas tipo Nielsen, su variación las péndolas Nielsen-Lohse, y por último la configuración radial de las péndolas tipo network, permaneciendo constantes los valores de cualquier variante diferente a la localización de las péndolas en el puente (carga soportada, cantidad de péndolas, esbeltez, entre otras).

OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE PUENTES TIPO ARCO CON PÉNDOLAS 14

Para comparar los efectos de las cargas dinámicas sobre cada uno de los modelos de puentes se buscará por medio de Sap2000 su modo de vibración fundamental, para ver el caso más crítico que afectará el puente y saber qué tipo de esfuerzos afectaran a cada parte del puente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el ángulo de inclinación de un puente tipo arco con péndolas tipo network para obtener un mínimo costo directo de material.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis paramétrico de un puente tipo arco con péndolas tipo network con el fin de encontrar el ángulo más adecuado para la optimización del puente o que pueda limitar su aplicación.
- Comparar el comportamiento estructural de un puente tipo arco con péndolas tipo network respecto a un puente arco con péndolas verticales o con la tipología de Nielsen.

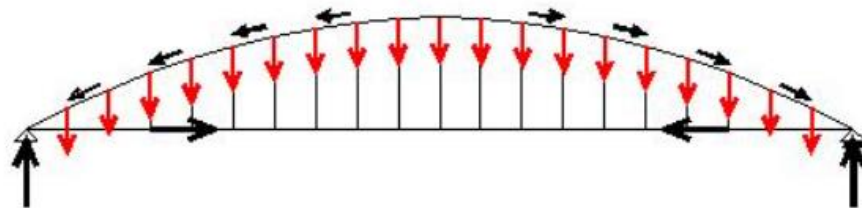
2. Optimización y comparación de costos de los puentes tipo arco con configuración de péndolas tipo network.

2.1. Comportamiento de un puente tipo arco con péndolas

En los puentes tipo arco, se busca normalmente salvar una luz que puede estar situada en distintos obstáculos que ofrece la orografía de un lugar, ya sea ríos, acantilados, zonas de alta inestabilidad geográfica entre otros, utilizando el elemento estructural arco. Este tendrá una forma antifunicular permitiendo que cuando este se cargue de manera uniforme, los esfuerzos generados sobre su arco son únicamente a compresión, y que la carga sea transmitida al tablero mediante las péndolas que cuelgan del arco, hasta el mismo, generando así que las resultantes de las cargas que se van a generar a los extremos del arco sean totalmente verticales, y que las mismas generadas por el tablero sean totalmente horizontales, tal como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 1.

Comportamiento estructural de las fuerzas de un puente tipo arco con péndolas rectas



Reduciendo notablemente las cargas que va a generar la estructura en el suelo, permitiendo que la subestructura de la cimentación sobre la cual se va a sostener este sea mucho menor a lo que se puede presentar en otro tipo de puentes, esto es de gran relevancia ya que es

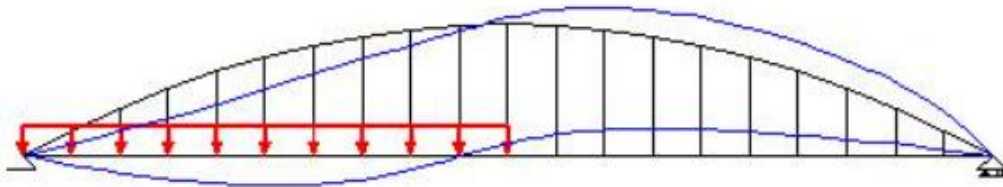
una ventaja muy amplia en los casos que van alrededor de un afluyente porque estos presentan gran inestabilidad geológica, debido a los niveles freáticos y la calidad de los materiales en su suelo.

El gran problema de los puentes arco atirantados es la aparición de momentos flectores alrededor del arco, esto debido a que en realidad las cargas transmitidas al arco no se localizan de manera uniforme, ni simétrica sobre este, un gran ejemplo de lo fuertes que pueden ser estas cargas es el paso de un tren de alta velocidad, caso que se ha estudiado y es de gran importancia en España y Holanda.

El efecto que los trenes de alta velocidad transmiten a los puentes puede apreciarse en la siguiente imagen, los esfuerzos flectores que aparecen en el arco por las cargas asimétricas son compatibles con el comportamiento esperado de un elemento estructural tipo arco (adaptado de <https://www.ingenieriayestructuras.com/sistema-pendolas-network-puentes-bowstring/>).

Figura 2.

Comportamiento estructural de los esfuerzos en un puente tipo arco con péndolas rectas



2.2. Puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen

En 1926 Octavius Nielsen patentó un sistema de péndolas inclinadas según una configuración en V que transformaba el esquema resistente tipo arco en otro tipo viga, comportándose el conjunto de forma más próxima a una viga en celosía. Efectivamente, cuando existen péndolas inclinadas, el traslado de la carga a los apoyos se mejora gracias a la componente inclinada de la fuerza de las péndolas. De este modo, el conjunto arco-péndolas-

tablero pasa a funcionar como una viga, cuya alma está formada por las péndolas, y los momentos flectores en arco y tablero disminuyen notablemente respecto las que se generan en el caso de los puentes con péndolas verticales.

Como contrapunto, la principal limitación del esquema tipo Nielsen consiste en la posibilidad de que una o varias péndolas entren en compresión. Este hecho se produce bajo un esquema de sobrecargas asimétrico, cuando la relación entre sobrecargas y cargas permanentes es elevada, tal y como sucede en estructuras con péndolas, puesto que podría producirse una inestabilidad de estas y por tanto dejarían de trabajar, el hecho de disponer péndolas de hormigón con una notable rigidez axial favorece en gran medida la utilización de este sistema.

Por otro lado, las frecuencias naturales de la pasarela también dependen en gran medida de la configuración de péndolas adoptada. Una de las principales limitaciones en el diseño de una pasarela es su comportamiento dinámico, dado que se tratan de estructuras muy ligeras donde este tipo de fenómenos pueden ser de gran relevancia. Existen numerosos casos en la bibliografía de las pasarelas que han tenido problemas en relación con este aspecto, como la pasarela del Milenio en Londres. A falta de realizar un análisis dinámico detallado, aspecto que sobrepasa el alcance de este proyecto (Sánchez-Solís 2016)

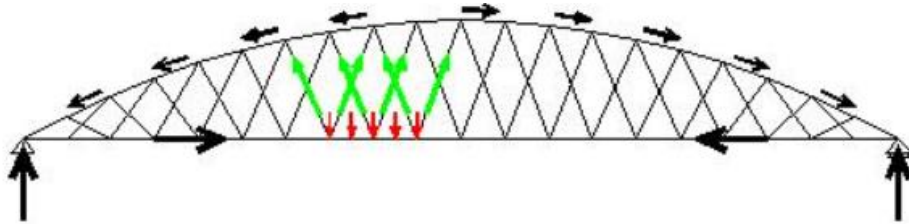
2.3. Puente tipo arco con configuración de péndolas network

En los años 50 el profesor e ingeniero noruego Per Tveit desarrolló el concepto de “network”, que en su artículo publicado en *The Structural Engineer* en junio de 1966 definió como un sistema que utiliza “péndolas inclinadas con múltiples intersecciones en el plano del arco”. Acosta, lógicamente, de una mayor complejidad y cuantías en el diseño del sistema de cuelgue se reduce notablemente el riesgo de entrada en compresión de las péndolas bajo

distribuciones no uniformes de sobrecargas, lo que permitía la extensión del sistema Nielsen a los tableros de las tipologías antes citadas.

Figura 3.

Comportamiento estructural de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas tipo network



El sistema network asegura una respuesta estructural de gran eficacia, que permite un dimensionamiento muy homogéneo, casi uniforme, del sistema de péndolas a lo largo de todo el tablero, al mismo tiempo que minimiza drásticamente el nivel de flexiones en arco y tablero lo que, al estar sometidos básicamente a esfuerzos casi exclusivamente axiales, hace posible diseños de elevada esbeltez geométrica, reducidas cuantías de acero estructural y, si se cuidan los diseños de los detalles en encuentros arco/tablero/tirantes, elevadísimas cualidades estéticas (Millanes, Matute).

2.3.1. Ventajas del sistema de configuración de péndolas network

Todas las ventajas que tiene el sistema de péndolas tipo network llevan en consecuencia algunas complejidades que van a repercutir directamente en los costos del puente. Una consecuencia, es que es el sistema constructivo se torna un poco más complejo ya que debido a los cruces que hay entre el sistema de péndolas, hay que diseñar detalles constructivos como los anclajes y conexiones entre péndolas para garantizar la continuidad de las péndolas. Existen

distintas soluciones para el anclaje. A continuación, se enumerará algunos de los detalles importantes que hay que tener en cuenta para el cálculo en los cruces de las péndolas en el puente.

1. Anclaje de las péndolas tanto en el arco como en el elemento del tirante.
2. Detalle de cruce de péndolas inclinadas (barras/cables). El sistema para utilizar para el cruce de las péndolas determinará la posible aparición de excentricidades entre las directrices de las péndolas y el arco.
3. Las péndolas deberán tener un sistema de tensado para su correcto funcionamiento
4. Es por lo tanto muy importante definir correctamente el proceso constructivo de la estructura

Pero entre sus grandes ventajas se puede destacar que el arco y el tablero pueden ser construidos de forma muy delgada generando una gran vista del arco y, por tanto, en su capacidad expresiva y en su configuración como elementos no sólo resistentes sino también estéticos. En efecto, en estos puentes el arco se constituye en el claro denominador del espacio, siendo contemplado no sólo desde la lejanía sino también por el propio usuario del puente. En este sentido, precisamente el arco metálico, con su esbeltez, ligereza y variabilidad en las formas, se ha erigido como el auténtico dominador de los puentes arco de tablero inferior, con un desarrollo muy relevante en el campo de las luces bajas y medias en las últimas décadas (particularmente en entornos urbanos y periurbanos) además que existe un óptimo uso de materiales utilizando geometrías esbeltas tanto en el sentido estructural como en el contexto del medioambiente. Esta cualidad de esbeltez permite que esta tipología de puentes ostente el récord de ser el puente arco más delgado del mundo (Puente Bolstadstraumen) (Pantaleón).

2.4. Elementos de los puentes arco con péndolas

2.4.1. El arco

Uno de los elementos más llamativos en este tipo de puentes es el arco y como se ha mencionado en secciones anteriores presenta un condicionamiento al comportamiento general de la estructura. Principalmente se caracteriza por los esfuerzos axiales compresivos a los que está sometido y su forma puede variar desde circulares, que presentan una mayor facilidad a la hora de la construcción, hasta formas más parabólicas.

Estos puentes, en general, presentan dos arcos gemelos colocados en cada uno de los extremos de la sección transversal del puente. Para puentes anchos es posible la utilización de tres o incluso cuatro arcos en paralelo con tablero de hormigón entre ellos. El material utilizado preferentemente en la actualidad es acero, pues hasta la década de los 50 la construcción de puentes en arcos atirantados presentaba arcos contruidos en hormigón para aprovechar su bien comportamiento a la compresión, esto fue cambiando, y se comenzó a preferir los arcos en acero, principalmente por dos razones, una disminución en los costos de andamiaje y un montaje más sencillo.

El uso de perfiles con sección transversal con momento de inercia bajo y con áreas suficientemente grandes es deseable, la razón de esto va asociada al hecho de los múltiples puntos de conexión entre el arco y los tirantes. Los perfiles más utilizados que se adjuntan a estas características son los U e IN y los perfiles de cajón soldado.

Debido a que la función que cumple el arco cuando actúa de manera similar a un enrejado es entregar una gran rigidez, es que este tipo de puentes tiene una gran utilidad para servir como puente ferroviario, debido a la gran sollicitación que genera el paso de un ferrocarril, es por tal motivo que hoy en día es una alternativa para puentes de trenes de alta velocidad.

2.4.2. Tablero

El tablero es el elemento que permite el paso peatonal y vehicular, algunos de los elementos que lo componen, son la calzada, vigas de borde y un pasillo para el tránsito de peatones o ciclovías. En este caso particular, los momentos de flexión longitudinales son muy pequeños, siendo los esfuerzos más importantes los de tipo axial en tracción, esto se debe a los muchos apoyos que le otorgan los tirantes al llegar a él. Esta condición permite la aplicación de tableros relativamente esbeltos, a su vez el soporte que le entregan los tirantes hace innecesario el uso de vigas de soporte adicionales a las vigas de borde.

Los tableros pueden confeccionarse de acero, como también de hormigón. Dada esta característica, se presenta la posibilidad de generar puentes mixtos o simplemente de acero, incluso el aporte de vigas metálicas de soporte bajo el tablero no es descartado. Respecto al refuerzo del hormigón del tablero, este puede darse en forma simplemente armada, en forma transversal, ahora bien, según Frank Schanack: “Si la distancia entre los arcos es de 10 metros, no es necesario utilizar un pretensado transversal (Valenzuela).

2.5. Ventajas de la tipología del puente arco con péndolas

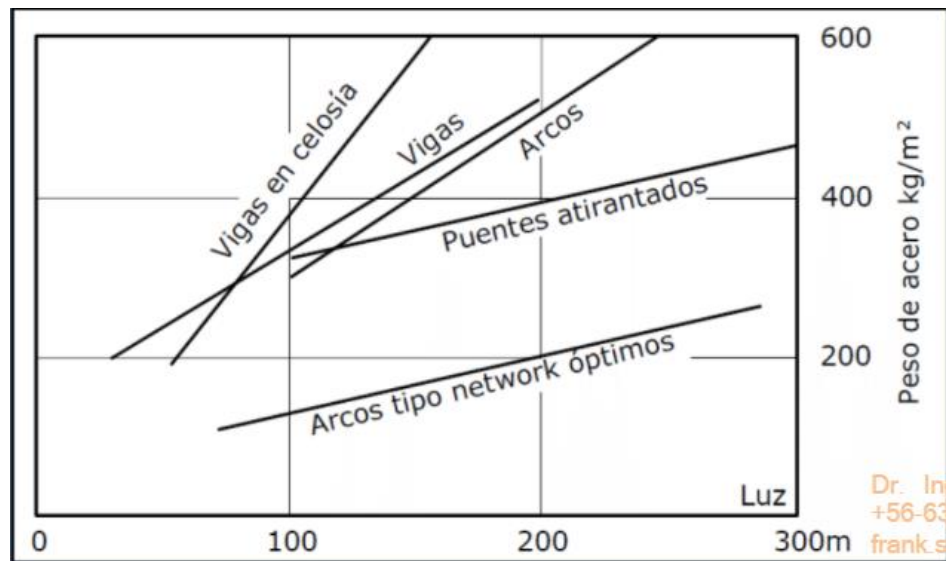
Ya comparados los sistemas de péndolas que puede tener el puente tipo arco entre sí, y sus ventajas y desventajas, nos damos cuenta de en qué casos podemos utilizar este tipo de puente. Pero ¿qué es lo especial que tienen estos puentes a diferencia de los otros tipos de puentes que pueden ser utilizados para superar los obstáculos orográficos para lo cual son solicitados?

Pues la gran ventaja que tienen los puentes tipo arco con péndolas es que pueden usar hasta la mitad del acero que se usa en otros tipos de soluciones reduciendo enormemente los

costos de este en cuestión de los materiales, ya que predomina el esfuerzo axial y hay poca flexión debido a las propiedades de la geometría y la interacción de las péndolas con este, favoreciendo también el uso de concretos de alta resistencia, el acero de alta resistencia y el uso de cables de pretensado (Schanack).

Figura 4.

Relación entre la cantidad de acero y la luz del puente, tomando cada una de las clases de puentes



Entre las grandes ventajas que tiene este particular sistema de puentes es que tienen una gran arquitectura que puede ser aprovechable de manera turística, y estructuralmente hablando la reducción significativa de las reacciones que genera la interacción puente suelo, permitiendo una reducción en las secciones de la cimentación que soportaría a la estructura, siendo perfectos para construir en laderas de ríos y zonas altamente inestables (Delgado).

Otras ventajas son:

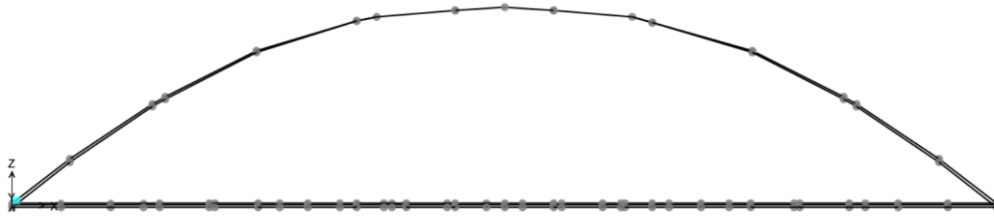
- Deformaciones pequeñas.
- Buen comportamiento sísmico.

- Canto muy reducido.
- Rampas cortas al puente, estribos bajos.
- Alta seguridad por alta redundancia de la estructura.
- Gran esbeltez de los elementos, aspecto transparente y elegante.
- Menos área con protección ante la corrosión.
- Alta durabilidad del tablero pretensado.

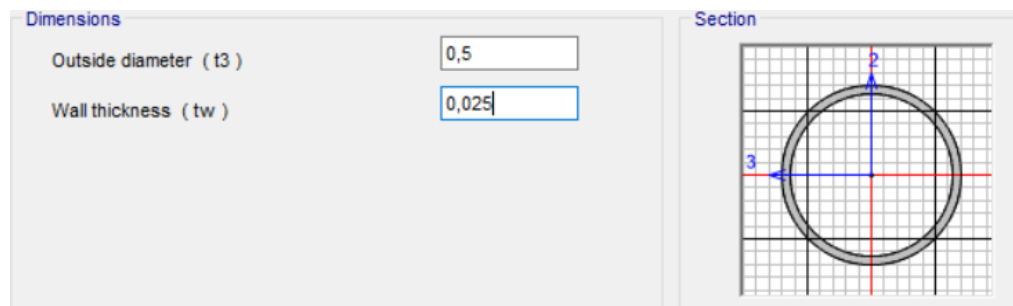
3. Análisis y comparación de las configuraciones de péndolas en puentes tipo arco

Al momento de ejecutar un proyecto de ingeniería uno de los mayores problemas es escoger el tipo de solución que se utilizará para satisfacer la problemática a resolver en el proyecto, esto es un gran problema al momento de seleccionar que tipo de sistema de péndolas es el óptimo para la realización, tanto en el sentido económico para beneficio del constructor, como para los usuarios al tener una solución estructuralmente eficiente.

Por esto, en este proyecto de grado se hará un análisis paramétrico de un puente tipo arco con péndolas en el cual solo se modificará la configuración de las péndolas al interior de los puentes, el modelo a desarrollar será un puente de 100 metros de largo, con una altura máxima de 20 metros, un tablero de 20 metros de ancho.

Figura 5.*Estructura base del puente arco*

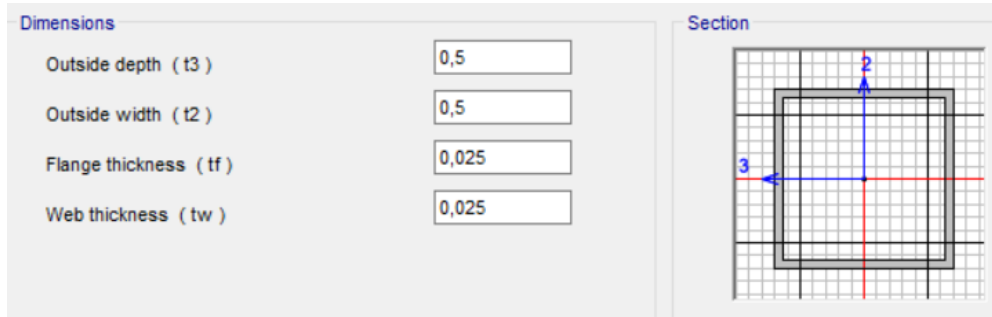
Con secciones metálicas huecas de 0.5 metros de diámetro y de 0.025 metros de espesor de acero A992Fy50, y 5 metros de largo, para las vigas longitudinales tanto como para el arco que componen la estructura, con una carga de 5 kN.m en las vigas longitudinales exteriores del tablero y una carga de 10 kN.m en su viga longitudinal central.

Figura 6.*Sección transversal de las vigas longitudinales del tablero y la sección del arco.*

Y con vigas transversales para terminar de formar el tablero de 5 metros de largo con sección cuadrada hueca de 0.5 metros de borde exterior, y 0.025 metros de espesor en cada una de sus paredes de acero A992Fy50.

Figura 7.

Sección transversal de las vigas transversales del tablero



Y cuyas péndolas tendrán un diámetro de 0.0287 metros y su área correspondiente será de 6.452×10^{-2} metros cuadrados, relleno de acero A992Fy50.

Figura 8.

Sección transversal de las péndolas



3.1. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas rectas

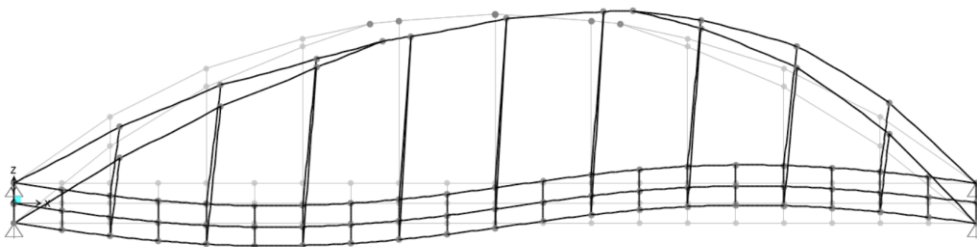
Como anteriormente se explicó en esta tesis, el puente tipo arco con configuración de péndolas rectas es el primero de las configuraciones usadas en el mundo, esta tiene la particularidad de que todo su arco trabajará a compresión y también su tablero, en situaciones donde la carga sea totalmente simétrica.

Para los resultados del análisis del sistema de péndolas se van a tomar los casos principales de cargas, axial, cortante, momento, y deflexiones máximas en las zonas central, derecha e izquierda del puente, para analizar cómo actúan las cargas en el puente.

Diagrama de deformaciones

Figura 9.

Deformaciones de un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas.



Deformación izquierda -0.8012 m

Deformación central -0.1685 m

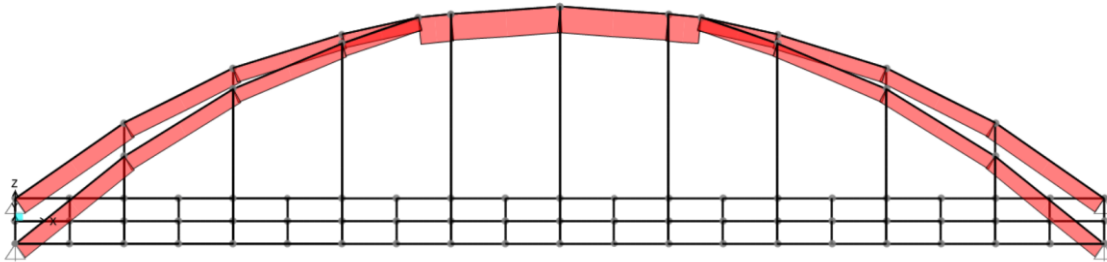
Deformación derecha 0.6282 m

Se toman las distancias de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ debido que al no tener una carga que ocupe la totalidad del puente, si no su mitad, ésta generará unas deformaciones más grandes en la zona de la carga.

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 10.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas



Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2397.78kN

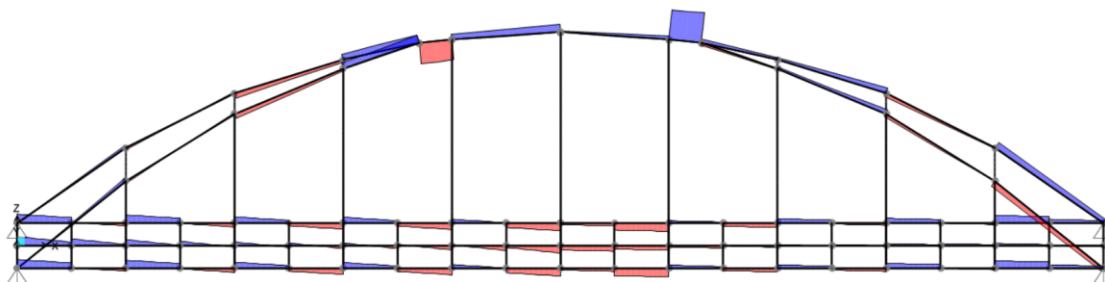
Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 217 kN

Este diagrama indicará las fuerzas a tensión y compresión como se puede ver el color rojo significa la compresión, y el color azul la tensión, pero como en este caso las fuerzas de tensión son notablemente menores a las de compresión no se alcanza a detallar las líneas de colores que lo representan

Diagrama de e cortantes

Figura 11.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas

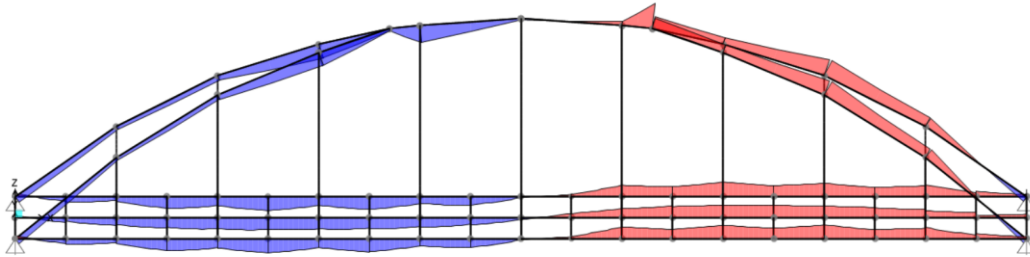


Cortante máximo 348.745 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 12.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas rectas



Momento flector máximo a tensión 830 kN.m

Momento flector máximo a compresión 1237.1 kN.m

En donde el color rojo representa los esfuerzos flectores a compresión y el color azul los esfuerzos flectores a tensión.

Al recopilar la información del análisis efectivamente el comportamiento del puente va a ser el que se encontró en la literatura, en donde se explica que al no tener cargas simétricas o dinámicas estas harán que el puente entre en un condición en donde sus momentos flectores van a actuar una parte netamente a compresión y la otra flexión, haciendo que una o varias péndolas entren de trabajar en tensión a compresión, dificultando la estabilidad del puente, y obligando a tomar la posible decisión de reemplazar estas por concreto para garantizar la estabilidad del puente en este caso.

3.2. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas

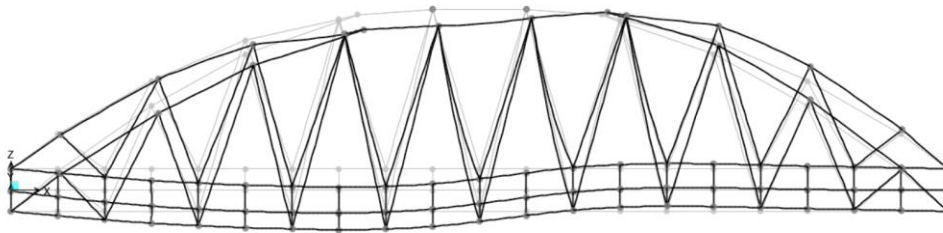
A diferencia del funcionamiento estructural de la configuración con péndolas rectas, y en un avance de este, la configuración con péndolas inclinadas hace que las péndolas se vean más involucradas mejorando el funcionamiento estructural de este, pero teniendo el mismo problema base aunque un poco menos notorio y es que una parte del puente tiene momentos flectores en

compresión y la otra en tensión haciendo que este pierda la funcionalidad de una o más péndolas y teniendo la posible entrada en compresión de estas.

Diagrama de deformaciones

Figura 13.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas



Deformación izquierda -0.20 m

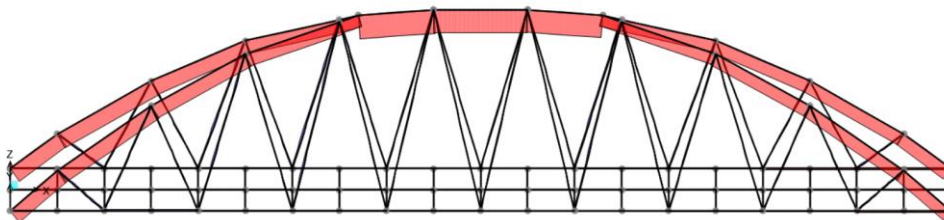
Deformación central -0.1079 m

Deformación derecha 0.057 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 14.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas



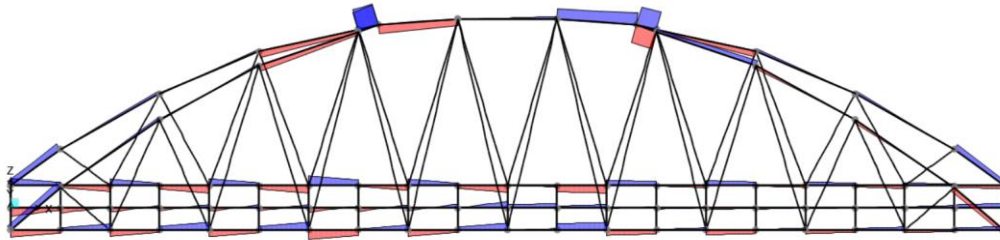
Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2521.24 kN

Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 218.8 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 15.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas

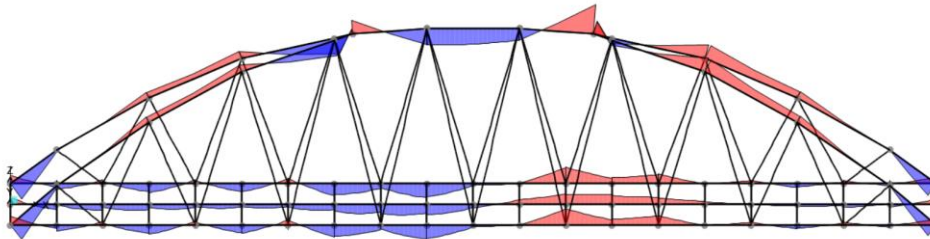


Cortante máximo 186.2 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 16.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas inclinadas



Momento flector máximo a tensión 361.26 kN.m

Momento flector máximo a compresión 645.83 kN.m

Dados los resultados del análisis, se puede notar sobre todo en el diagrama de momentos flectores como la inclinación de las péndolas empiezan a modificar estos momentos flectores, en donde estos ya no van a verse de una forma en donde todos entran en compresión a la vez, si no de una forma diferente, esto por el trabajo que realizarán las péndolas llevándose una

componente de la fuerza que caerá sobre estas, mostrando una reducción significativa de los momentos flectores sobre el puente.

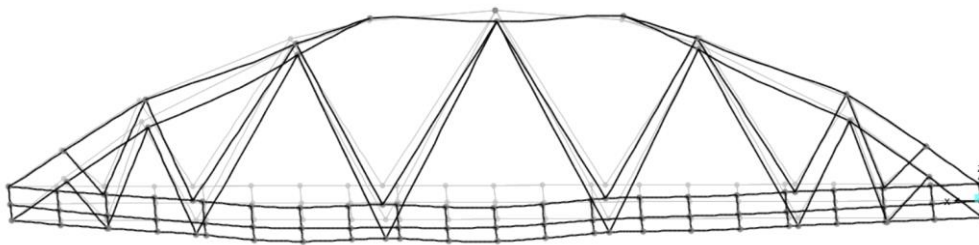
3.3. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen superior

A diferencia de la configuración de péndolas inclinadas, la configuración de Nielsen es de 60° de inclinación con respecto al tablero. En donde la definimos inferior o superior, por su parte central en donde sus péndolas pueden ir a la parte inferior o a la parte superior. En su comportamiento estructural este puente también presentará falencias parecidas a sus antecesores, pero a diferencia de estos, van a ser un poco menores sin evitar la consecuencia que una o más péndolas puedan dejar de trabajar.

Diagrama de deformaciones

Figura 17.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen superior



Deformación izquierda -0.226 m

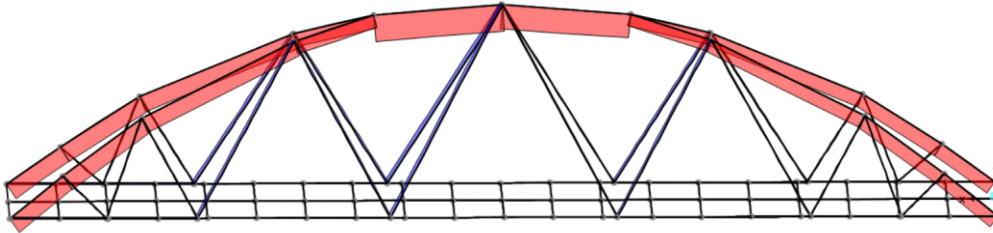
Deformación central -0.2304 m

Deformación derecha -0.14 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 18.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior



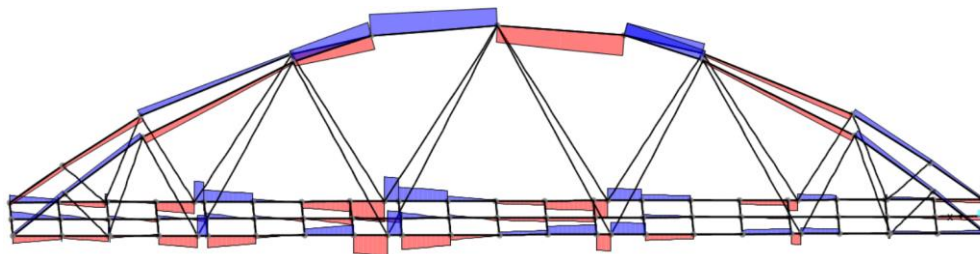
Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2664.64 kN

Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 370.46 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 19.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior

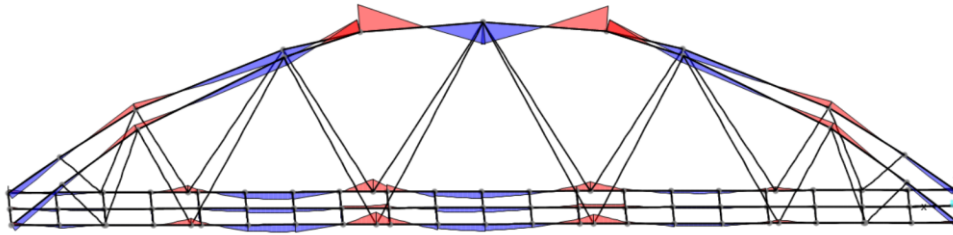


Cortante máximo 219.56 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 20.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen superior



Momento flector máximo a tensión 1173.73 kN.m

Momento flector máximo a compresión 1440.88 kN.m

En esta configuración de péndolas se nota ya como debido a la inclinación el arco ya no entra en la dicotomía de que una zona entra en flexión y la otra en compresión, mejorando su comportamiento y volviéndola más estable, también se puede observar una gran diferencia en el comportamiento de las deformaciones del puente ya que todas son hacia abajo, en contrario de los anteriores modelos, presentando el comportamiento de viga mencionado anteriormente.

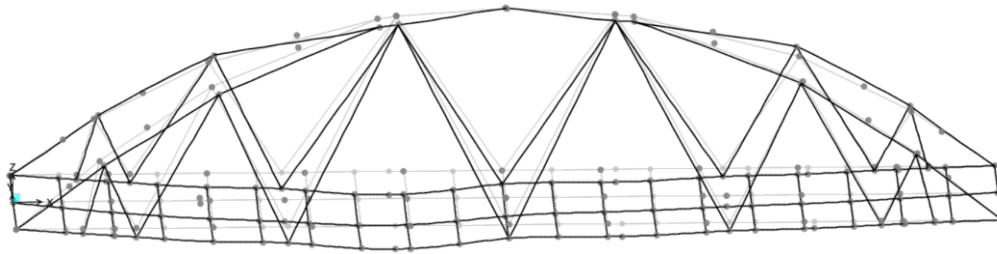
3.4. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen inferior

La diferencia entre esta tipología ante la anterior como ya se mencionó es que las péndolas centrales ya no caen en el arco, si no en la parte inferior, en el tablero, esto hará que los esfuerzos cambien; Sin embargo, funcionará de manera parecida a como funcionaron con el anterior tipo de puente.

Diagrama de deformaciones

Figura 21.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen inferior



Deformación izquierda -0.242 m

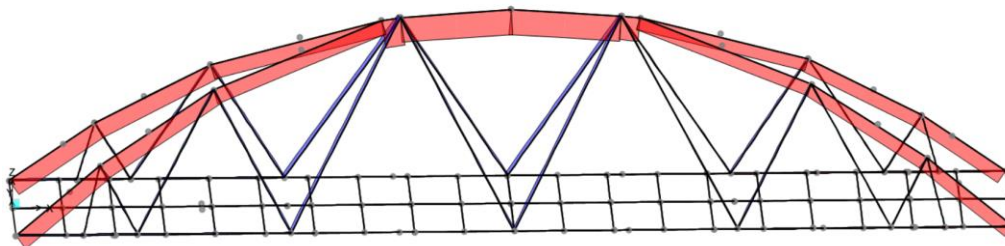
Deformación central -0.14 m

Deformación derecha -0.1246m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 22.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior



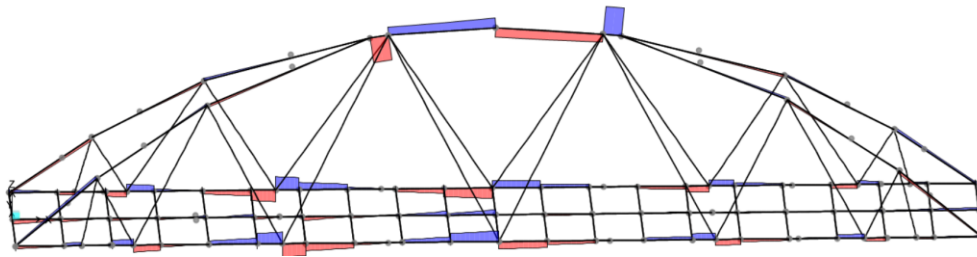
Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2819.8

Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 368.77 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 23.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior

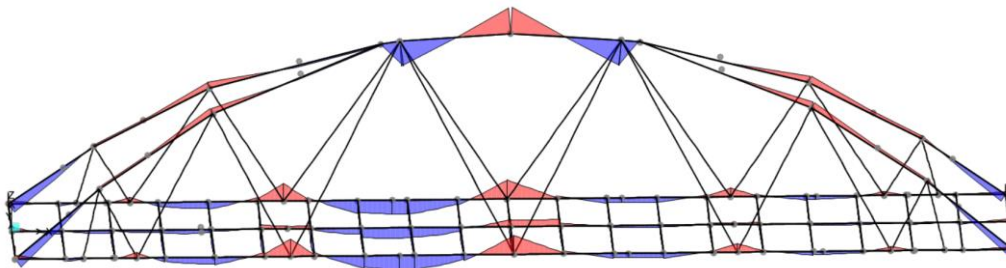


Cortante máximo 485 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 24.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen inferior



Momento flector máximo a tensión 839.45 kN.m

Momento flector máximo a compresión 872.53 kN.m

En comparación con el sistema de péndolas superior de Nielsen, el sistema inferior, aunque tiene una deformación máxima mayor, presenta menores deformaciones menores en los otros puntos de análisis, también se puede observar que los momentos flectores se reducen sustancialmente teniendo mejor estabilidad, pero en contraparte el esfuerzo cortante se disparó.

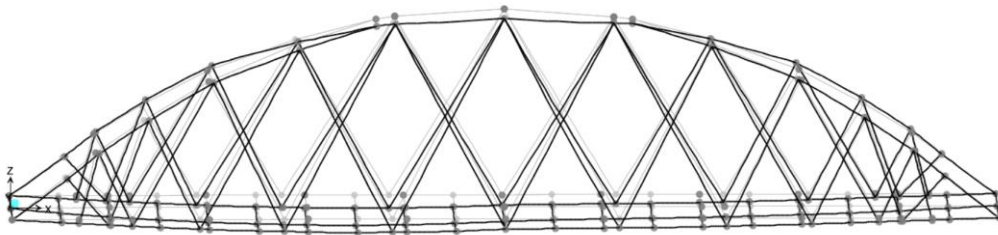
3.5. Análisis puente tipo arco con configuración de Nielsen-Lohse

Esta configuración es básicamente una fusión de las dos tipologías anteriores, y fue propuesta y patentada por los profesores Lohse y Nielsen, también llamada como la primera configuración tipo network, con esta configuración se podría presentar compresión en menos péndolas, ya que al entrecruzarse y ser tantas se distribuyen de mejor forma las fuerzas que se van a presentar tanto en el arco como en el tablero.

Diagrama de deformaciones

Figura 25.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de Nielsen-Lohse



Deformación izquierda -0.1356 m

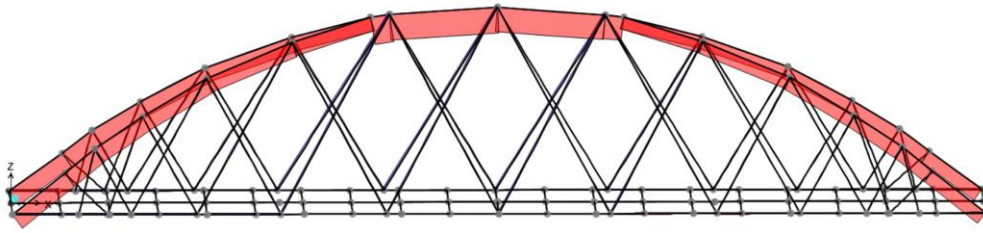
Deformación central -0.1054 m

Deformación derecha -0.0932 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 26.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse



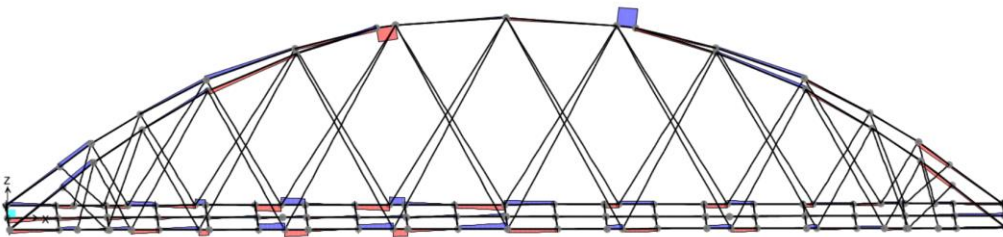
Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2762.94 kN

Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 184.212 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 27.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse

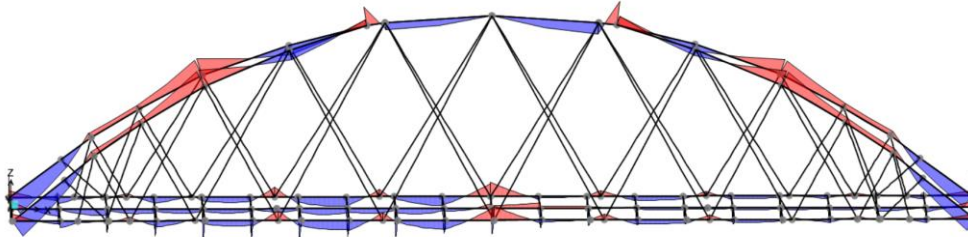


Cortante máximo 312.14 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 28.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas de Nielsen-Lohse



Momento flector máximo a tensión 326 kN.m

Momento flector máximo a compresión 405.28 kN.m

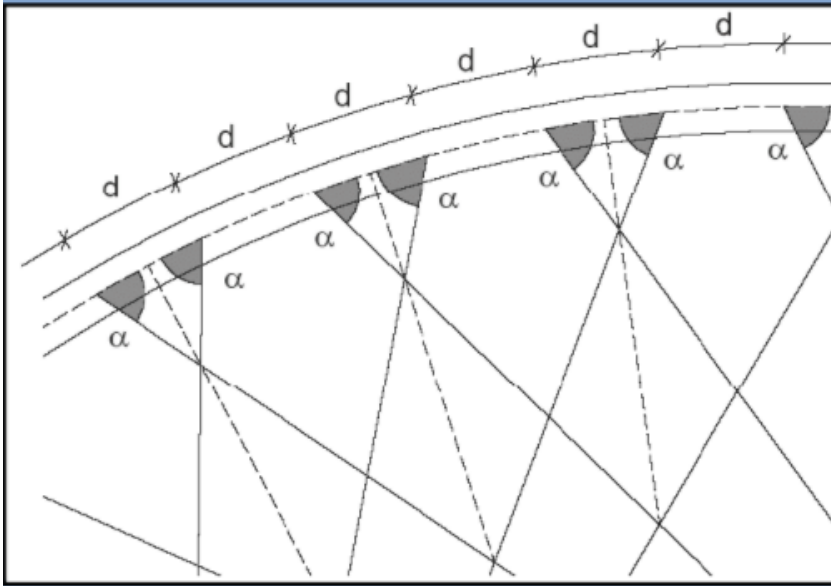
A diferencia de los dos anteriores casos, se puede decir que, este absorbe de mejor forma las cargas generando menos momentos flectores debido a la cantidad de péndolas, ya que como se puede ver en los diagramas, se redujo a la mitad la deformación máxima del puente y se mantuvo el comportamiento de viga, también se observa una reducción de la mitad de los momentos flectores, e incluso con respecto al modelo de péndolas de Nielsen inferior podemos apreciar una reducción significativa en el cortante, todo esto hace que la configuración de Nielsen-Lohse sea increíblemente mucho más, estable y estática que las anteriores, solo funcionando las dos tipologías.

3.6. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network

A diferencia de los anteriores tipos de configuraciones de péndolas, la configuración tipo network es un poco más variable, puesto que ésta se toma desde rayos radiales a cada tanto la distancia que uno desee, haciendo que ésta sea muy variable saliendo del arco, como lo muestra la siguiente figura.

Figura 29.

Ángulos de salida de las péndolas en puente arco con configuración de péndolas network



los ángulos pueden variar desde los 40° hasta los 55° , ya que si superamos o disminuimos estos límites algunas péndolas serían conectadas de una zona del arco a otra.

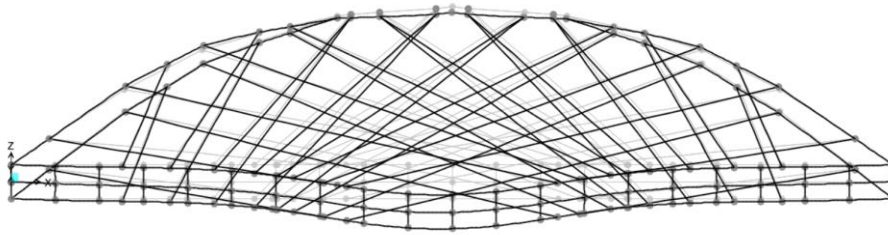
En este proyecto de grado tomaremos las configuraciones que irán desde los 35° hasta los 50° variando de a 5° grados en su ángulo con respecto al arco, esta tipología de puente asume unos costos mucho mayores en accesorios y mano de obra calificada en vista de que las péndolas se entrecruzarán más de una vez con otra, haciendo que sea necesario el uso de técnicas extra para poder solucionar dicha condición.

3.6.1. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 35° .

Diagrama de deformaciones

Figura 30.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 35°



Deformación izquierda -0.3098 m

Deformación central -0.8541 m

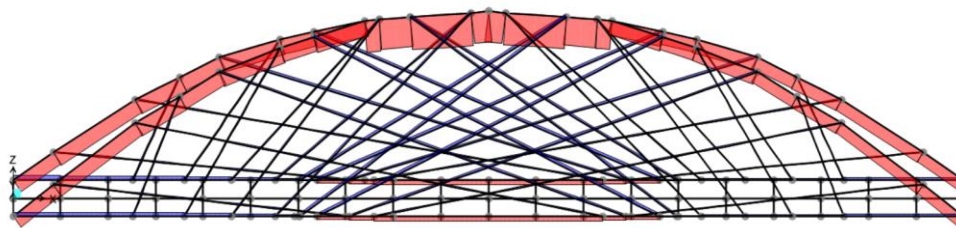
Deformación derecha -0.2384 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 31.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a

35°



Fuerza máxima axial a compresión en el arco 3712.11 kN

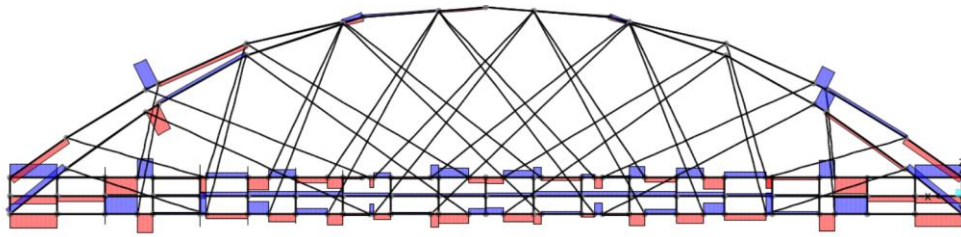
Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 306.87 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 32.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 35°



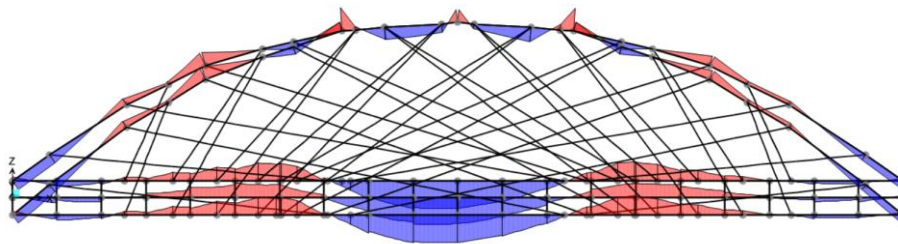
Cortante máximo 494.121 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 33.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 35°



Momento flector máximo a tensión 530.84 kN.m

Momento flector máximo a compresión 840.96 kN.m

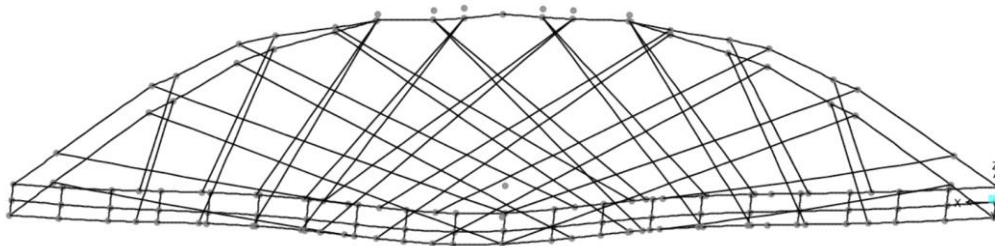
Esta configuración network posee múltiples problemas ya que en la sección central del puente sus péndolas se encuentran muy alejadas, y en las secciones de los extremos sus péndolas se encuentran muy pegadas, haciendo que en sus extremos se controlen las deformaciones pero que en su centro se disparen, esto también se ve reflejado en sus momentos flectores los cuales aumentan significativamente, sobre todo en el tablero, que va a verse muy afectado al contrario de las demás configuraciones.

3.6.2. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 40°

Diagrama de deformaciones

Figura 34.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 40°



Deformación izquierda -0.2016 m

Deformación central -0.3491 m

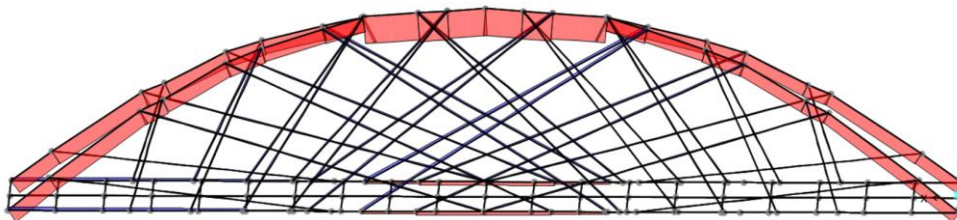
Deformación derecha -0.1732 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 35.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a

40°



Fuerza máxima axial a compresión en el arco 3331.92 kN

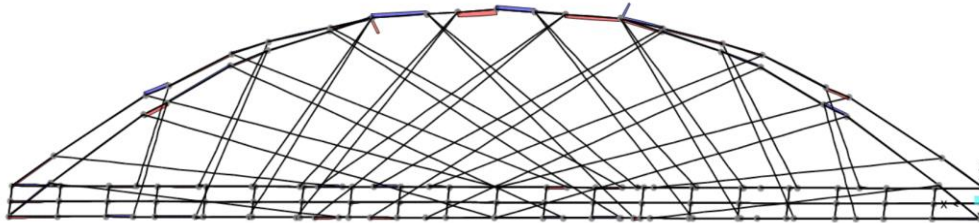
Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 277.605 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 36.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 40°



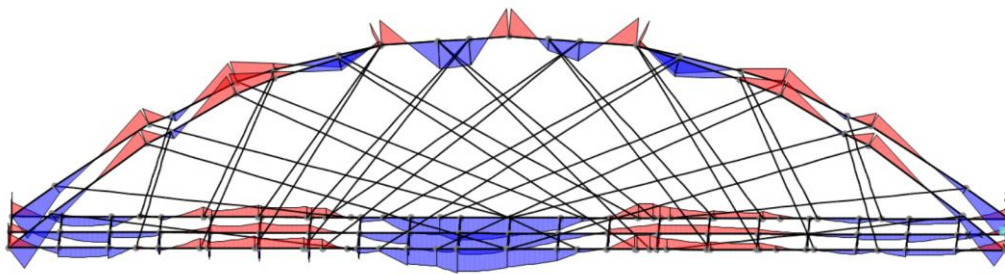
Cortante máximo 550.71

Diagrama de momentos flectores

Figura 37.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 40°



Esfuerzo máximo a tensión 550.1 kN.m

Esfuerzo máximo a compresión 550.2 kN.m

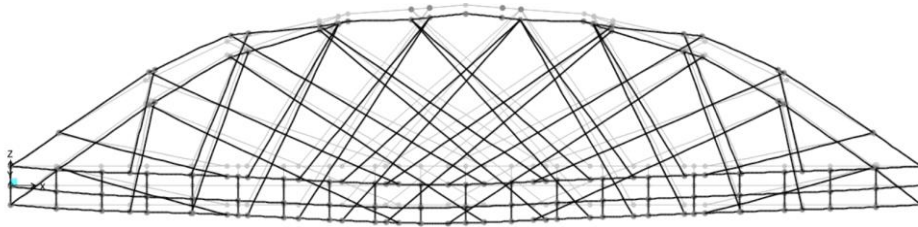
A diferencia de la anterior configuración en ésta se disminuyeron notablemente las deformaciones, mostrando un comportamiento más estable, pero todavía sin ser el más óptimo, se redujeron notablemente los momentos flectores, y se distribuyeron de forma más equitativa a lo largo del arco, y los cortantes disminuyeron.

3.6.3. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 45°

Diagrama de deformaciones

Figura 38.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 45°



Deformación izquierda -0.173 m

Deformación central -0.1998 m

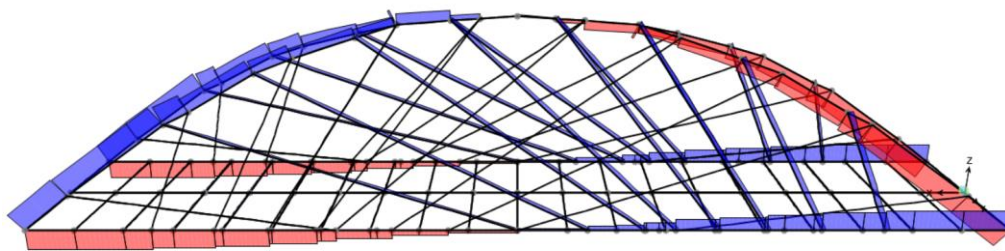
Deformación derecha -0.142 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 39.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a

45°



Fuerza máxima axial a compresión en el arco 3031.285 kN

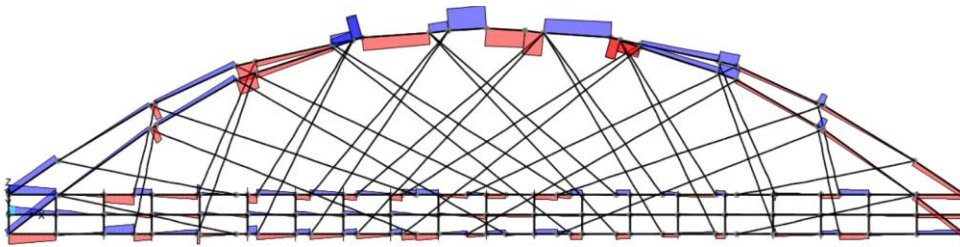
Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 213.31 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 40.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 45°



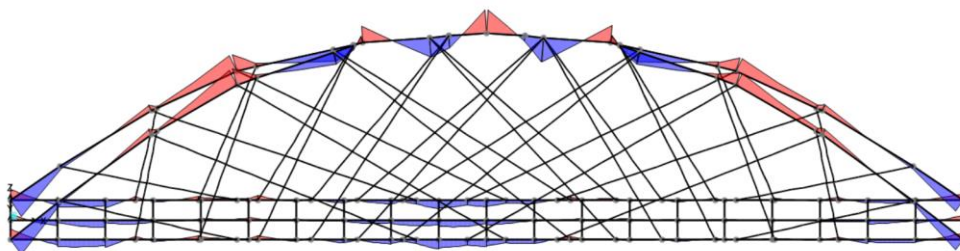
Cortante máximo 249.92 kN

Diagrama de momentos flectores

Figura 41.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network

a 45°



Momento flector máximo a tensión 630.62 kN.m

Momento flector máximo a compresión 607.24 kN.m

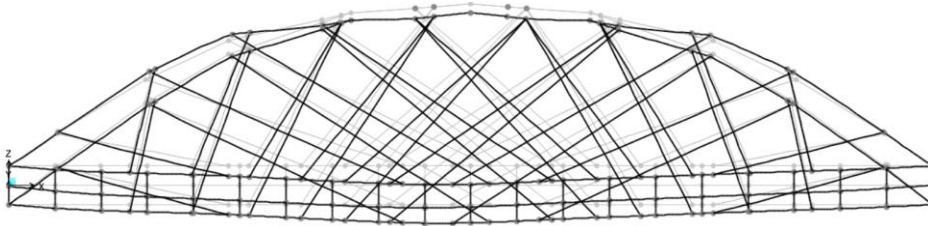
Esta configuración redujo las fuerzas axiales presentes en el puente, y también el cortante y la deformación máxima, pero sus momentos flectores aumentaron considerablemente, haciéndola más inestable

3.6.4. Análisis puente tipo arco con configuración de péndolas network a 50°

Diagrama de deformaciones

Figura 42.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración Network a 50°



Deformación izquierda -0.1336 m

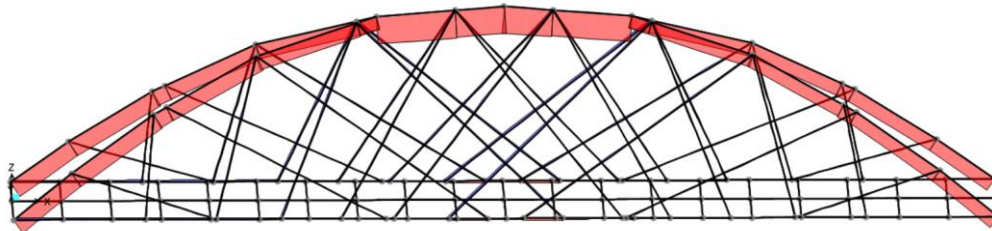
Deformación central -0.1431 m

Deformación derecha -0.1225 m

Diagrama de fuerzas axiales

Figura 43.

Comportamiento de las fuerzas axiales en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°



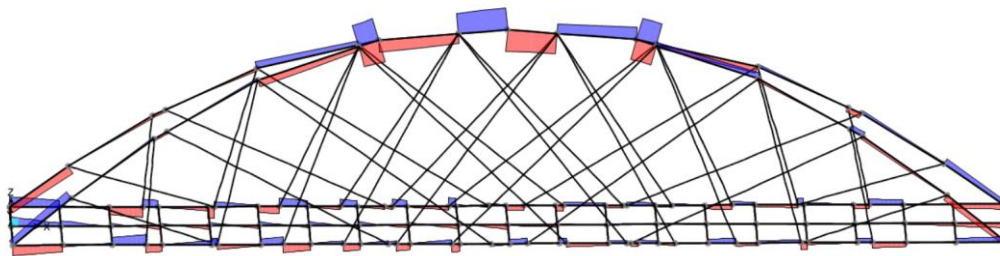
Fuerza máxima axial a compresión en el arco 2806.712 kN

Fuerza máxima axial a tensión en las péndolas 199.4 kN

Diagrama de esfuerzos cortantes

Figura 44.

Comportamiento de los esfuerzos cortantes en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°

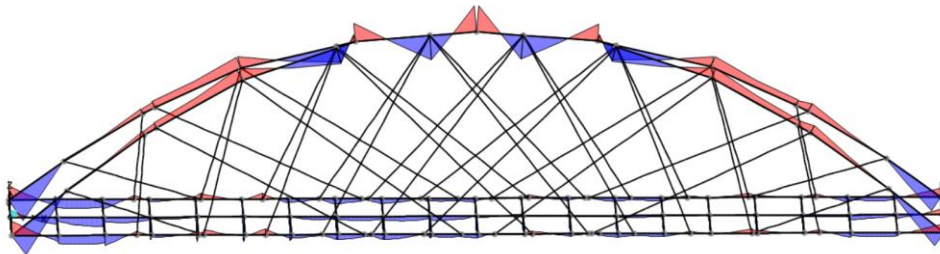


Cortante máximo 219.059 kN

Diagrama de esfuerzos de momentos flectores

Figura 45.

Comportamiento de los esfuerzos flectores en un puente tipo arco con configuración de péndolas Network a 50°



Esfuerzo máximo a tensión 505.64 kN.m

Esfuerzo máximo a compresión 556.38 kN.m

Es el mejor ángulo para la configuración de péndolas network, ya que esta reduce de mayor manera los momentos flectores, y los cortantes que va a tener la estructura de manera significativa, y tiene el mejor control de deformaciones teniendo la menor de esta configuración.

4. Comparación de todos los sistemas de péndolas en los puentes tipo arco

Cada uno de los puentes analizados anteriormente tiene sus ventajas y desventajas al entrar a competir sobre si se puede usar como una solución viable para un proyecto de construcción, esto se puede clasificar de diferentes formas, ya que todas las configuraciones de péndolas son viables dependiendo de los factores que se tengan para el momento de escoger que cargas actuarían sobre el modelo a escoger.

Al comparar los modelos nos damos cuenta de que hay dos casos en los que son más variables y críticos los resultados que son el caso de deformaciones y de momentos flectores.

OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE PUENTES TIPO ARCO CON PÉNDOLAS 50

Análisis de las deformaciones

Tabla 1.

Configuración de péndolas vs deformaciones

Configuración de péndolas	deformación máxima [m]
Rectas	0,812
inclinadas	0,2
Nielsen superior	0,2304
Nielsen inferior	0,242
Nielsen-Lohse	0,1356
Network 35°	0,3098
Network 40°	0,3491
Network 45°	0,1998
Network 50°	0,1431

De la anterior tabla podemos darnos cuenta de que las menores deformaciones se presentan en las configuraciones de Nielsen-Lohse y network 50°, ambas sin superar los 15 cm, pero estas deformaciones máximas están ubicadas en lugares diferentes, dado que en la configuración de Nielsen-Lohse se encuentran hacia la dirección en donde se encuentra la carga, y en cambio en la configuración Network de 50° se encuentra en la mitad del puente.

Análisis de momentos flectores

Tabla 2.

Configuración de péndolas vs momentos flectores máximo

Configuración de péndolas	Momentos flectores máximos [kN-m]
Rectas	1237,1
inclinadas	645,83
Nielsen superior	1440,88
Nielsen inferior	872,53
Nielsen-Lohse	405,28
Network 35°	840,96
Network 40°	550,2
Network 45°	630,62

Network 50°	556,38
--------------------	---------------

De la anterior tabla podemos darnos cuenta de que los menores momentos flectores se presentan en las configuraciones de Nielsen-Lohse, network 40° y network 50°, en este criterio si encontramos una gran diferencia dado que la configuración de Nielsen-Lohse tiene momentos flectores muy inferiores a comparación de las demás configuraciones de péndolas haciéndolo el mejor.

Del análisis de estas dos tablas podemos inferir que la mejor configuración de péndolas para un puente tipo arco es la configuración de Nielsen-Lohse porque es la configuración que menores deformaciones y esfuerzos tiene, seguida de la configuración de péndolas tipo network 50° que también demostró un buen desempeño.

3. Conclusiones

- El ángulo más óptimo para la construcción de un puente tipo arco con configuración de péndolas network es de 50° con respecto a su arco, ya que el puente con esta configuración permite el desarrollo total a tensión de todas las péndolas, disminuyendo las fuerzas que van a recorrer el arco y el tablero, permitiendo una reducción tanto de los momentos flectores, como cortantes y fuerzas axiales, haciendo que las secciones transversales sean optimizables, debido a que los momentos flectores estarán mejor distribuidos a lo largo del arco y tablero, teniendo una mayor reducción del costo directo de material.
- El límite de los ángulos en los que se puede usar los puentes tipo arco con configuración de péndolas network, es entre 35° a 50° dado que, al disminuir de estos valores, o aumentarlos, algunas péndolas saldrán del arco, a conectar con otra parte de este, haciendo inútil su uso, ya que no reducirían cargas, y en el ángulo que tendrá los mejores resultados será el puente tipo arco con configuración de péndolas network de 50°
- En comparación con casi todas las configuraciones de péndolas que tiene un puente tipo arco, la configuración network es la mejor, exceptuando por la configuración de Nielsen-Lohse, la cual es la mejor configuración para un puente tipo arco, dado que esta tiene tanto como menores deformaciones debido a las mismas cargas, como menores momentos flectores.

Referencias Bibliográficas

Castillo Pérez Rodrigo Napoleón, Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería civil, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador, Diseño preliminar de la superestructura de un puente en arco atirantado tipo network sobre el río Puchucho.

Francico Millanes Mato, Luis Matute Rubio, Jorge Bebreda Sánchez, “Pasarela Bowstring del anillo verde ciclista de Madrid”, IDEAM, S.A.

Frank Schanack Dr, Ing, Universidad de Chile, El porqué y el cómo del arco tipo network, XV congreso nacional de estudiantes de Ingeniería Civil, agosto de 2011.

García Guerrero, J. M., Segado García, E., Jorquera Lucerga, J. J., Departamento de Ingeniería Civil, E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203, Cartagena (España) Estudiante de doctorado, Escuela Internacional de Doctorado, UPCT.

Jesús Troyano García, “Sistema de Péndolas Network en puentes Bowstring”. Extraído de <https://www.ingenieriayestructuras.com/sistema-pendolas-network-puentes-bowstring/>

Matías Andrés Valenzuela Saavedra, “Evaluación de factibilidad estructural de puentes atirantados tipo network como alternativa de puentes en Chile”, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería Civil.

Pantaleón Prieto Marcos Jesús, PhD., Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, presidente de APIA XXI-LB IDC, Ramos Gutiérrez Óscar Ramon, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Responsable de la división de estructuras APIA XXI – LB IDC.

Puente arco-network, una alternativa elegante y eficiente, ingeniero Louise Delgado, <https://slideplayer.es/slide/14210023/> [citado 10 de octubre de 2020].

Rodríguez Parrilla Juan Miguel, Ingeniero civil, Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Linares, Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Cálculo de la estructura de una pasarela peatonal para el término municipal de Úbeda.

Sánchez-Solís Rabadán Diseño de la superestructura de una pasarela sobre el río Cérvol en Vinaroz (Castellón), usando hormigón de altas prestaciones (UHPC) ejecución, procedimiento constructivo y valoración. [Trabajo fin de Máster]. Universidad politécnica de Valencia, Valencia, junio de 2016

Somenson M. Héctor, Estudio y proyecto de puentes de hormigón armado.