



Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil  
Carrera de Ingeniería Civil

**Diseño estructural de un acueducto atirantado sobre una  
falla geológica para el sistema de agua potable de los  
recintos Playas, La Barquilla y El Paraíso de la parroquia  
Rosa Florida, cantón Sucumbíos**

Autora: Alicia Isolina Vásquez Cabrera  
Tutor: Ing. Diego Xavier Jara Almeida, MsC. MBA.

Quito, agosto 2021



## DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Alicia Isolina Vásquez Cabrera, con cédula de ciudadanía número 100461427-5, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Alicia Isolina Vásquez Cabrera

C.C. 100461427-5

# **DECLARATORIA**

El presente Trabajo de Titulación titulado:

**“Diseño estructural de un acueducto atirantado sobre una falla geológica para el sistema de agua potable de los recintos Playas, La Barquilla y El Paraíso de la parroquia Rosa Florida, cantón Sucumbíos”**

Realizado por:

**ALICIA ISOLINA VÁSQUEZ CABRERA**

Como requisito para la obtención del Título de:

**INGENIERA CIVIL**

Ha sido dirigido por el profesor

**ING. DIEGO XAVIER JARA ALMEIDA, MSC. MBA.**

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

Diego Xavier Jara Almeida

**TUTOR**

# DECLARATORIA DE PROFESORES INFORMANTES

Los profesores informantes:

Ing. Luis Soria Núñez, MsC.

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Mag.

Después de revisar el trabajo presentado,

Lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal  
examinador

Luis Soria Núñez

Hugo Marcelo Otáñez Gómez

## **DEDICATORIA**

A mis padres, mi hermana y a mis abuelitos porque con su presencia y memoria me enseñaron a luchar por mis sueños.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi padre, por su apoyo y enseñanza a lo largo de toda mi carrera. A mi madre y mi hermana, por su apoyo incondicional y confianza en mí.

A mis abuelitos, quienes con su presencia y memoria me enseñaron a ser perseverante y luchar por mis sueños en todo momento.

A mi tutor de tesis, Ing. Diego Jara y cotutor, Ing. Marcelo Otáñez, por su guía en mi desarrollo profesional, carrera y titulación.

## **RESUMEN**

Este trabajo presenta el diseño de un acueducto atirantado con una luz de 306 metros cuya finalidad es comunicar el Sistema de Agua Potable de los recintos Playas, La Barquilla y Rosa Florida del cantón Sucumbíos, provincia de Sucumbíos. Para ello, se han realizado modelos matemáticos en un programa de análisis estructural de elementos finitos donde se analiza el comportamiento de la estructura frente a estados de carga como: peso propio, sobrecargas, sismo, viento y temperatura. De esta manera, se comprueba el diseño de puentes atirantados para acueductos son factibles en puentes de grandes luces siempre que las características del tablero, torre y obenques permitan que se tenga un diseño óptimo, seguro y acorde a las solicitaciones propias del proyecto.

## **PALABRAS CLAVE**

Puentes atirantados, Diseño estructural de puentes, Superestructura de puentes con grandes luces, Acueductos atirantados.

## **ABSTRACT**

This project proposes the design of a cable-stayed aqueduct with a span of 306 meters whose purpose is to communicate the Potable Water System for the communities: Playas, La Barquilla and Rosa Florida in Sucumbíos province. Thus, mathematical models have been carried out with a Finite Element Method (FEM) program where the behaviour of the structure is analyzed under load states such as: dead load, live loads, earthquake, wind, and temperature. In order that, the design of cable-stayed bridges for aqueducts is found to be feasible in bridges with large spans if the characteristics of the deck, tower and cables allow it to have an optimal and safe design according to the request of the project.

## **KEY WORDS**

Cable-stayed bridges, Structural design of bridges, Superstructure of bridges with large span, Cable-stayed aqueducts.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: Definición del caso de estudio .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Proyectos previos.....	3
1.4. Definición de variables .....	4
1.4.1. Relación entre variables .....	5
1.5. Hipótesis .....	7
1.6. Objetivos .....	7
1.6.1. Objetivo Principal.....	7
1.6.2. Objetivos Secundarios.....	8
1.7. Alcance .....	8
1.8. Limitación .....	8
1.9. Justificación.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Introducción a los acueductos.....	10
2.2. Tipos de puentes.....	11
2.3. Introducción a los puentes atirantados.....	17
2.4. Sistemas de obenques.....	17
2.4.1. Estabilidad .....	18
2.4.2. Configuración longitudinal .....	20
2.4.3. Configuración transversal .....	25
2.5. Torres o pilones .....	26
2.5.1. Configuración longitudinal .....	27
2.5.2. Configuración transversal .....	28

2.6. Tablero.....	30
CAPÍTULO III: Metodología.....	31
3.1. Estado actual .....	31
3.2. Estudios preliminares.....	32
3.2.1. Estudios topográficos .....	32
3.2.2. Estudios de suelos .....	32
3.2.3. Estudios hidráulicos.....	33
3.3. Filosofía de diseño y normas aplicadas .....	33
3.4. Métodos de análisis estructural.....	34
3.4.1. Elementos finitos .....	34
3.4.2. Descripción del modelo matemático.....	34
CAPÍTULO IV: Análisis de cargas y modelación matemática .....	36
4.1. Estimación de cargas.....	38
4.1.1. Estimación de la carga muerta. ....	38
4.1.2. Estimación de la carga viva. ....	40
4.1.3. Estimación de la carga de viento.....	40
4.1.4. Estimación de carga por temperatura.....	40
4.1.5. Estimación de la carga sísmica. ....	41
4.1.6. Combinaciones de cargas.....	43
4.2. Materiales de diseño .....	45
4.2.1. Acero A36.....	45
4.2.2. Acero A709 Grado 50.....	45
4.2.3. Características de los obenques .....	46
4.3. Modelación de la estructura .....	52
4.3.1. Tablero .....	52
4.3.2. Torre.....	53

4.3.3. Obenques.....	55
CAPÍTULO V: Diseño estructural del acueducto .....	56
5.1. Tablero.....	56
5.2. Torres.....	59
5.2.1. Criterio de esbeltez.....	59
5.2.2. Diseño a compresión.....	60
5.3. Obenques.....	62
CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones .....	63
6.1. Conclusiones.....	63
6.2. Recomendaciones .....	64
6.3. Trabajos futuros .....	65
BIBLIOGRAFÍA .....	66

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación geográfica del cantón Sucumbíos. ....	1
Ilustración 2. Parroquias del cantón Sucumbíos. ....	2
Ilustración 3. Partes de un puente colgante. ....	3
Ilustración 4. Diagrama del acueducto Tempul, España. ....	4
Ilustración 5. Relación entre variables.....	7
Ilustración 6. Canales abiertos y cerrados. ....	10
Ilustración 7. Acueducto de Tempul .....	11
Ilustración 8. Acueductos romanos. ....	12
Ilustración 9. Acueducto de madera sobre Festiniog Railway, Reino Unido. ....	13
Ilustración 10. Acueducto Pontcysyllte. ....	13
Ilustración 11. Acueducto de Tardienta, España. ....	14
Ilustración 12. Acueducto Ringvaart Haarlemmermeer, Holanda.....	14

Ilustración 13. Puente García Morato.....	15
Ilustración 14. Forth Bridge, Reino Unido.....	15
Ilustración 15. Puente arcos de Alconetar, embalse de Alcántar. ....	15
Ilustración 16. Puente de la Bahía, San Francisco.....	16
Ilustración 17. Puente de Tataru, Japón.....	16
Ilustración 18. Puentes atirantados. ....	17
Ilustración 19. Elevación esquemática de un puente atirantado. ....	18
Ilustración 20. Sistemas de cables para puentes atirantados: sistema de ventilador, de arpa, de cable arpa modificada. ....	18
Ilustración 21. Sistemas de cables según su estabilidad. ....	19
Ilustración 22. Sistema de cables con configuración de ventilador. ....	19
Ilustración 23. Sistema de cables en arpa.....	19
Ilustración 24. Sistema de arpa de cables múltiples, torre rígida y soportes laterales desplazados a los extremos. Recuperado de: Gimsing, 1983. ....	20
Ilustración 25. Modelo de sistema de arpa con dos pares de baquetas.....	20
Ilustración 26. Momentos según la rigidez. ....	21
Ilustración 27. Sistema semi – arpa. ....	21
Ilustración 28. Longitudes de vanos. ....	21
Ilustración 29. Sistema asimétrico.....	22
Ilustración 30. Sistema de abanico.....	22
Ilustración 31. Disposiciones estructurales para el sistema de cables de abanico. ....	23
Ilustración 32. Sistema de cables en múltiples tramos.....	24
Ilustración 33. Puente General Rafael Urdaneta.....	24
Ilustración 34. Puente de suspensión central.....	25
Ilustración 35. Puente de suspensión lateral.....	25
Ilustración 36. Puente de suspensión en tres planos. ....	26

Ilustración 37. Puente Rey David, Jerusalén.....	27
Ilustración 38. Puente de Talavera, España.....	27
Ilustración 39. Puente del Alamillo. ....	28
Ilustración 40. Torre con configuración de Y invertida.....	28
Ilustración 41. Torre de un solo mástil y dos planos de cable inclinados. ....	29
Ilustración 42. Configuraciones para torres con dos mástiles. ....	29
Ilustración 43. Diagrama de momentos flectores en puentes atirantados. ....	30
Ilustración 44. Proyección demográfica a nivel parroquial. ....	31
Ilustración 45. Vista 3D del modelo del paso elevado planteado. ....	37
Ilustración 46. Vista 3D del plano del paso elevado planteado. ....	37
Ilustración 47. Zonificación sísmica de Ecuador.....	41
Ilustración 48. Geología local. ....	41
Ilustración 49. Espectro de diseño. ....	42
Ilustración 50. Constitución de cables. ....	46
Ilustración 51. Torones de capa simple.....	47
Ilustración 52. Torones Seale.....	48
Ilustración 53. Torones Filler. ....	48
Ilustración 54. Torones Warrigton. ....	48
Ilustración 55. Torones Warrington Seale de 36 alambres.....	49
Ilustración 56. Torones Warrington Seale de 26 alambres.....	49
Ilustración 57. Configuración de tirantes pretensados.....	49
Ilustración 58. Características de los Pasos Regulares derecho e izquierdo. ....	51
Ilustración 59. Características de los Pasos Lang derecho e izquierdo. ....	51
Ilustración 60. Vista frontal del acueducto atirantado. ....	52
Ilustración 61. Definición de la tubería para embeber. ....	52
Ilustración 62. Geometría de las torres ....	53

Ilustración 63. Sección tubular para correas. ....	54
Ilustración 64. Sección tubular para diagonales. ....	54
Ilustración 65. Obenques. ....	55
Ilustración 66. Cargas a tensión y compresión de la estructura. ....	56
Ilustración 67. Corte de la sección transversal del tablero. ....	57
Ilustración 68. Diagrama de corte del tablero. ....	58
Ilustración 69. Diagrama de momento del tablero. ....	58
Ilustración 70. Diagramas de corte y momento en las torres. ....	59
Ilustración 71. Corte transversal de la torre. ....	61
Ilustración 72. Configuración en abanico del sistema de obenques. ....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetro de la tubería a 25 y 75 años. ....	38
Tabla 2. Datos para la determinación de la carga por la tubería. ....	39
Tabla 3. Carga de la tubería. ....	39
Tabla 4. Carga muerta (sin incluir el peso propio) del puente. ....	39
Tabla 5. Carga viva. ....	40
Tabla 6. Carga de viento. ....	40
Tabla 7. Periodo vs aceleración elástica e inelástica de piso. ....	42
Tabla 8. Periodo de la estructura. ....	43
Tabla 9. Combinaciones de carga. ....	43
Tabla 10. Tipologías de acero empleadas en el diseño. ....	46
Tabla 11. Características de los materiales. ....	56
Tabla 12. Datos de la sección. ....	56
Tabla 13. Diseño a flexión y corte del tablero. ....	57
Tabla 14. Comprobación de la sección en tracción. ....	59

Tabla 15. Datos del material y de la sección adoptada.....	60
Tabla 16. Chequeo por pandeo general y local de la sección.....	60
Tabla 17. Comprobación de la sección en tracción.....	62

# CAPÍTULO I: Definición del caso de estudio

## 1.1. ANTECEDENTES

El Gobierno Autónomo Descentralizado de Sucumbíos se encuentra ubicado en la provincia de Sucumbíos. Limita al norte con la provincia de Carchi y Colombia, al sur con los cantones Cascales y Gonzalo Pizarro, al este con los cantones Cascales, Gonzalo Pizarro y Colombia; y al oeste con las provincias de Carchi e Imbabura (Dirección de planificación y ordenamiento territorial , 2015).



Ilustración 1. Ubicación geográfica del cantón Sucumbíos.

Recuperado de: Área Ecológica de Conservación La Bonita Cofanes-Chingual.

El cantón Sucumbíos, cuya cabecera cantonal y única parroquia urbana es La Bonita, fue creado en 1955 junto a cuatro parroquias rurales: El Playón de San Francisco, Rosa Florida, Santa Bárbara y La Sofía (Coral, 2013). Hasta 2014, contaba con una cobertura de agua potable de 71.4% y de alcantarillado de 52.7% (SENPLADES).

La parroquia Rosa Florida se encuentra junto al margen del río Chingual, en dirección hacia Puerto Libre, a 18 kilómetros de La Bonita. Desde su conformación en 1943, ha tenido una tasa de crecimiento poblacional y económica baja debido a la falta de servicios básicos y vías de comunicación (del Ojo, 1990). En 2017, el GAD Municipal de Sucumbíos realizó los estudios para la construcción del proyecto Sistema de Agua Potable para los recintos Playas, La Barquilla y el Paraíso de esta misma parroquia.

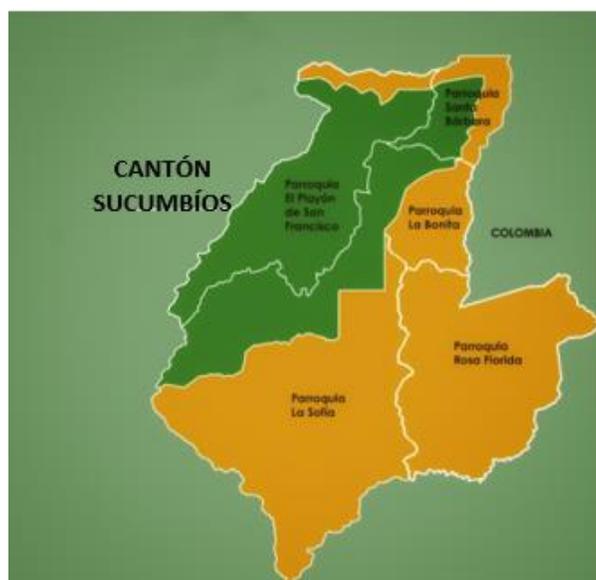


Ilustración 2. Parroquias del cantón Sucumbíos.

Recuperado de: Área Ecológica de Conservación La Bonita Cofanes-Chingual.

A partir de un censo provincial en 2016, se determinó que la población en la parroquia Rosa Florida era de 375 habitantes, por lo cual se estima que en la actualidad existen 426 habitantes (GAD Provincial de Sucumbíos). El periodo de diseño del nuevo sistema de agua potable es de 25 años, de modo que la dotación con la que fue diseñada la red es para 685 habitantes.

El diseño actual menciona la necesidad de un paso elevado sobre una falla geológica que comunique el sistema a los recintos La Barquilla y El Paraíso, sin embargo, el mismo no se encuentra desarrollado. Los pasos elevados tienen una vida útil de 75 años, por lo que es necesario que la estructura tenga capacidad para albergar una tubería acorde a la dotación que se requerirá para entonces. Las proyecciones poblacionales indican que la dotación deberá abastecer aproximadamente a 2790 habitantes para cuando culmine la vida útil del paso elevado.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las poblaciones de sectores rurales, a lo largo de la historia, se han visto limitadas al acceso de servicios básicos como el agua potable. Estas circunstancias derivan en problemas de salud pública que se vuelven más críticas cuando existen pandemias como el Covid-19. Los pasos elevados son estructuras que conectan los sistemas de abastecimiento de agua sobre obstáculos de diferente naturaleza, tales como: fallas geológicas, fuentes de agua o vías.

En este caso, se presenta una propuesta de diseño estructural de puente atirantado para un paso elevado de 306 metros de luz total. Esta estructura forma parte del proyecto Sistema de Agua Potable para los recintos Playas, La Barquilla y El Paraíso de la parroquia Rosa Florida, cantón Sucumbíos, provincia de Sucumbíos. A través de ella será posible abastecer de agua potable aproximadamente a 426 habitantes y a la población futura durante 75 años.

Este proyecto, coordinado por el GAD Municipal de Sucumbíos se encuentra actualmente en construcción, sin embargo, aún no se cuenta con el diseño del paso elevado. Por lo que, a partir del mismo, será posible abastecer de agua potable a los recintos La Barquilla y El Paraíso, que se encuentra luego del acueducto previsto.

### 1.3. PROYECTOS PREVIOS

Existen una gran cantidad de puentes atirantados, sin embargo, los diseños de puentes para acueducto de este tipo no son muy comunes. En el diseño de pasos elevados es más frecuente el uso de puentes colgantes donde la flecha que forma la catenaria del cable principal depende de la luz libre.

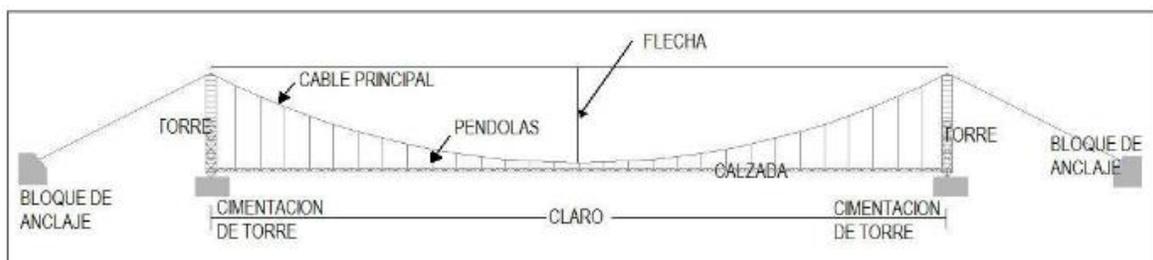


Ilustración 3. Partes de un puente colgante.

Recuperado de: Calderón, 2010, pág. 12.

Los puentes atirantados son adecuados cuando los claros del puente se encuentran entre los 100 y 500 metros. Existen casos especiales donde la luz alcanzada llega a los 800 metros como el Tatara en Japón, e incluso a 890 metros de longitud como es el caso del Pont de Normandie en Francia. Al tratarse de viaductos, los elementos estructurales, no estarán sometidos a las mismas solicitaciones que un acueducto.

El acueducto de Tempul es un puente atirantado ubicado en La Barca de la Florida, España. Esta icónica estructura presenta un uso similar al requerido en el sistema de agua potable de Rosa Florida, sin embargo, existen algunas diferencias considerables entre ellos: el puente de Tempul sobre el río Guadalete tiene un claro de 100.50 metros (Cámara, 2011), mientras que el paso elevado en Rosa Florida cruza una

falla geológica que consiste en un deslizamiento activo y tiene una luz libre de 306 metros. De igual manera, el paso elevado español no cuenta con el mismo análisis modal espectral que el puente de Rosa Florida, pues este último se encuentra en una zona sísmica.

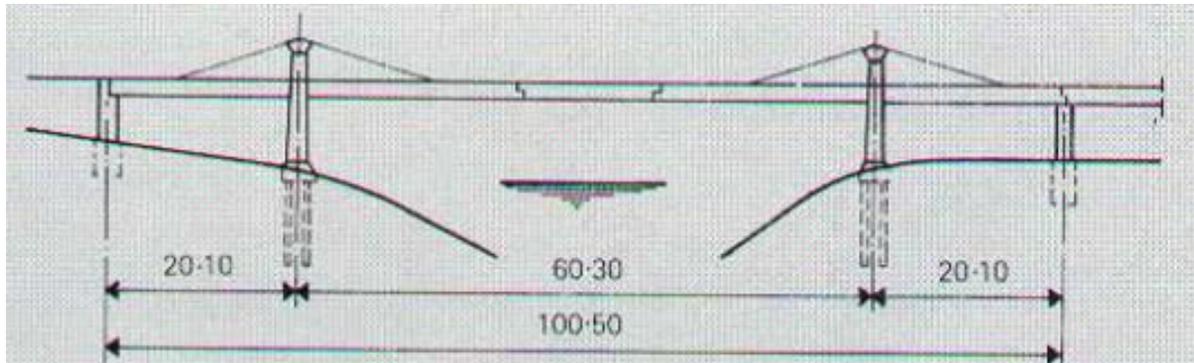


Ilustración 4. Diagrama del acueducto Tempul, España.

Recuperado de: Carrión et al, 2005, pág. 2.

## 1.4. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Dentro del análisis y desarrollo del caso de estudio existen variables independientes que actúan como condiciones de borde, así como variables dependientes a partir de las cuales se establecen el diseño del paso elevado. A continuación, se presentan y definen cada una de las variables, así como los métodos por los cuales se cuantifican.

### VARIABLES INDEPENDIENTES

- *Luz libre*: distancia total entre dos pilones cuyo valor está expresado en unidades de longitud y depende de la topografía del terreno, características geotécnicas, así como de las especificaciones propias del diseño hidráulico.
- *Proyecciones demográficas*: indica el número de habitantes luego de determinados años mediante métodos de proyección demográfica. La información requerida para este análisis corresponde a los datos obtenidos de censos poblacionales o provinciales.
- *Condiciones ambientales*: características climáticas y meteorológicas de la zona de emplazamiento, donde las precipitaciones y velocidad del viento son las más importantes para el diseño. La información está plasmada en anuarios meteorológicos, donde las unidades para las precipitaciones están dadas en milímetros, mientras que la velocidad del viento se encuentra en metros sobre segundo.

- *Diámetro de tubería*: sección de la tubería que cruza el paso elevado, la cual depende de la dotación y está establecida en el diseño hidráulico del proyecto. Esta dimensión está dada en unidades de longitud, especialmente en milímetros.
- *Estados de carga*: está conformado por las cargas de diseño, es decir la carga muerta, viva, de viento y sísmica. Las cargas se encuentran en unidades de peso sobre área, especialmente kilogramos sobre metros cuadrados.
- *Características geológicas y geotécnicas*: están descritas en los estudios de suelos, luego de la realización y análisis de resultados obtenidos de ensayos en laboratorio. Estos ensayos permiten describir distintas condiciones del suelo, por lo que las unidades de medida son acordes a la condición que se analiza. A partir de ellos se identifica el tipo de suelo, perfil estratigráfico y características mecánicas del suelo donde se realiza el proyecto.
- *Topografía del terreno*: el levantamiento topográfico del terreno plasma las coordenadas, curvas de nivel de terreno y azimut del proyecto. Las unidades de medición que se emplean son medidas de longitud y grados.

### **VARIABLES DEPENDIENTES**

- *Tipo de acueducto*: el tipo de puente se clasifica según la luz libre que puede salvar, por lo que deriva en un esquema estático diferente. Si bien esta variable no se puede medir o cuantificar, los rangos de claros que alcanzan influyen en el tipo de diseño. Los puentes atirantados cubren luces entre 100 y 500 metros.
- *Tubería proyectada*: tubería que albergará el puente luego de los 25 años de periodo de diseño del actual sistema de agua potable, hasta el fin de la vida útil de la estructura a los 75 años de su construcción.
- *Materiales de diseño*: materiales que se utilizarán el diseño de los elementos estructurales: tablero, torres y obenques. Las unidades de medida difieren según la propiedad mecánica que se analice.
- *Secciones de los elementos*: dimensiones y cantidad de cada uno de los componentes que conforman los elementos estructurales: tablero, torres y obenques. Las unidades en las cuales se expresa esta variable son de longitud.

#### **1.4.1. RELACIÓN ENTRE VARIABLES**

La sinergia entre las variables independientes y dependientes permite establecer los objetivos e hipótesis a estudiar. El motivo que provoca este efecto es el

establecimiento de variables independientes que son solventadas en las variables dependientes con cuales se relaciona. Desde esta perspectiva, se concibe un diseño que da solución a la propuesta estudiada.

El tipo de acueducto se encuentra en función de la luz libre a salvar y de la topografía. Esto se debe a la clasificación de los puentes según el claro que alcanzan. Por otro lado, la diferencia entre curvas de nivel puede volver más factible el diseño de una tipología de puente por sobre otra, considerando los gálibos mínimos que requiera la estructura.

Por otro lado, la tubería proyectada está determinada únicamente en función de las proyecciones demográficas. La relación entre ellas se debe a que, el incremento de la población implica un aumento de dotación, por lo que la sección de tubería que se use a futuro deberá ser mayor a la del diseño actual. La tubería para la que esta estructura está diseñada corresponde a aquella requerida hasta el fin de la vida útil de la estructura.

Los materiales de diseño dependen de la luz libre, las condiciones ambientales y los estados de carga. El motivo que asocia los estados de carga y la luz con los materiales son los esfuerzos que se generan en los elementos estructurales, lo cual implica que estos cuenten con las suficientes propiedades mecánicas para que el diseño sea óptimo. Las condiciones ambientales determinan las características del material, debido a que la exposición a ciertas sustancias afecta su comportamiento.

Finalmente, las secciones de los elementos están influenciados por el diámetro de la tubería, los estados de carga, la topografía, las condiciones geológicas y geotécnicas. El aumento del diámetro de la tubería implica un cambio en los estados de carga sobre el puente, no solo por el cambio en el peso considerado para el conducto, sino también por el incremento de la dotación y, por lo tanto, en la carga del agua. La topografía, condiciones geológicas y geotécnicas influyen en la altura de las torres y el dimensionamiento de los elementos.

Esta relación se presenta en la ilustración a continuación.

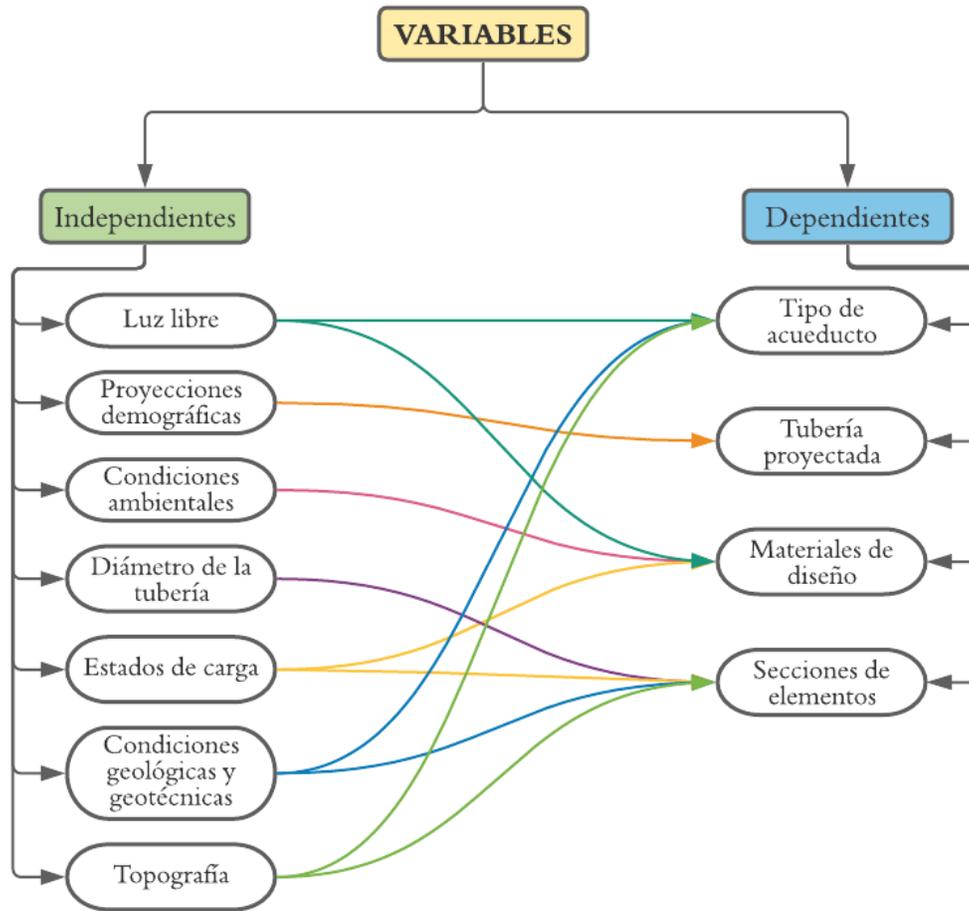


Ilustración 5. Relación entre variables.

Fuente: propia

## 1.5. HIPÓTESIS

Los pasos de acueductos con luces mayores a 300 metros pueden ser salvados mediante diseños de pasos atirantados, donde los elementos estructurales sean principalmente de acero y se ajusten a las condiciones especiales y solicitaciones propias del proyecto.

## 1.6. OBJETIVOS

### 1.6.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Desarrollar el diseño de un acueducto de 306 metros de luz sobre una falla geológica mediante un sistema atirantado para abastecer del servicio de agua potable a la parroquia Rosa Florida del cantón Sucumbíos.

### **1.6.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS**

- Identificar los estados de carga a los que está sometido el acueducto siguiendo normativas aplicables para este diseño, de manera que se obtengan diseños óptimos.
- Realizar un análisis modal espectral del paso elevado conforme a las normas correspondientes para que el diseño se ajuste a las condiciones sísmicas a las que estará sometido.
- Determinar las características de los materiales a partir de las solicitaciones para el diseño de la superestructura y subestructura del acueducto.
- Elaborar un modelo matemático de la estructura en un programa computacional de análisis estructural tridimensional para verificar las dimensiones de los elementos y evaluar el comportamiento de la estructura bajo las solicitaciones evaluadas.
- Establecer las dimensiones de los elementos que conforman la estructura en base a los estados de carga a los que está sometida y los materiales empleados para obtener un diseño óptimo.

### **1.7. ALCANCE**

El presente trabajo únicamente se focalizará en el diseño estructural del paso elevado para acueducto, en el que se incluye el dimensionamiento de los elementos que conforman la superestructura, el diseño de la subestructura y conexiones.

Para el diseño de la superestructura, se incluye la estimación de la dotación al final de la vida útil, así como el diámetro de tubo requerido en tal caso. Para ello, se contemplan los respectivos estados de carga, así como los estudios geotécnicos de la zona de emplazamiento.

### **1.8. LIMITACIÓN**

Este proyecto no se enfoca en el desarrollo de un manual de mantenimiento para luego de la construcción. Tampoco incluye el presupuesto ni cronograma valorado para la construcción.

### **1.9. JUSTIFICACIÓN**

La propuesta de tesis presenta una alternativa de diseño estructural de un acueducto para dar continuidad a la matriz de conducción del proyecto Sistema de Agua Potable para los recintos Playas, La Barquilla y El Paraíso de la parroquia Rosa Florida,

cantón Sucumbíos. El mismo tiene una luz de 306 metros y se encuentra sobre una falla geológica que consiste en un deslizamiento activo. El desarrollo de este diseño permitirá abastecer de agua potable a los recintos La Barquilla y El Paraíso, los cuales cuentan con una población de 426 habitantes.

El desarrollo de los diseños del paso elevado que abastece de agua potable a los recintos mencionados aporta un beneficio económico a la institución que lo ejecuta, pues contempla futuras ampliaciones en la red y las correspondientes cargas a las cuales estará sometido. De igual manera, posee trascendencia, pues permite evaluar posteriormente el comportamiento estructural de acueductos con grandes luces en zonas sísmicas.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. INTRODUCCIÓN A LOS ACUEDUCTOS.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable son obras de conducción que permiten distribuir este servicio a una población. Están conformados por estructuras que cumplen con funciones específicas como: captación, tratamiento, almacenamiento y distribución (Barahona, 2010).

La distribución se realiza a través de canales abiertos o cerrados, los cuales presentan diferencias entre sí. El flujo en canales abiertos cuenta con una superficie libre abierta a la atmósfera y, por ende, expuesta a factores externos contaminantes, motivo por el cual no se utiliza en sistemas de agua potable (Ruiz et al, s/f). La conducción por canales cerrados se realiza mediante tuberías, evitando la contaminación del agua tratada para consumo humano (López, 2000). En este caso, el flujo es interno, por consiguiente, el ducto está totalmente lleno y se impulsa por diferencias de presión (Ruiz et al, s/f).

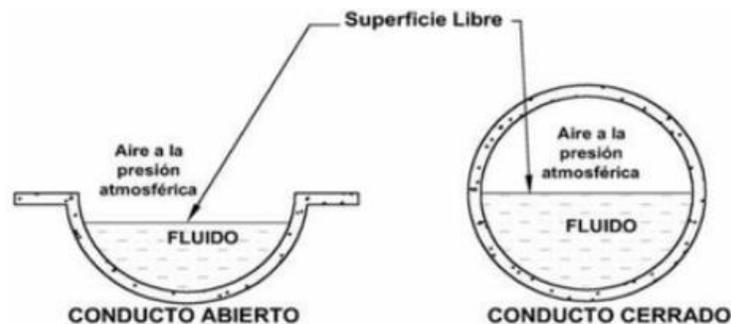


Ilustración 6. Canales abiertos y cerrados.

Recuperado de: Ruiz et al, s/f.

La distribución de agua potable a la población supera obstáculos de distinta naturaleza, tales como: fallas geológicas, flujos de agua o vías. En dichos casos, se requieren de estructuras que permitan dar continuidad al sistema de distribución, donde su diseño contemple condiciones topográficas, ambientales, geográficas, geológicas y geotécnicas de la zona de emplazamiento.

La selección del tipo de estructura depende de la función que va a cumplir, pues en base a ello se pueden definir las cargas de diseño. La clasificación de las estructuras se realiza en función de los esfuerzos que se generan en los elementos estructurales bajo los estados de carga (Kassimali, 2015). Esta clasificación es aplicable tanto para las estructuras de edificación, como para aquellas de ocupación especial, es decir puentes, tanques, entre otros (NEC-SE-DS, 2015).



Ilustración 7. Acueducto de Tempul  
Recuperado de: Torroja, 1925, pág. 2.

## 2.2. TIPOS DE PUENTES

Los puentes son estructuras que proveen un medio para conectar dos puntos separados por obstáculos como: valles profundos, ríos, autopistas, entre otros (Naaman, 2004). Su diseño y planificación respeta requerimientos técnicos de resistencia, seguridad y servicio, así como estéticos, ambientales, económicos y sociales. Los puentes son fundamentales en sistemas integrados, pues controlan su capacidad, su fallo implica el colapso parcial o total y, son los componentes más costosos por unidad de longitud (Naaman, 2004).

Existen distintas clasificaciones, las cuales se realizan según sus características, es decir material, función, luz libre máxima, esquema estático, entre otros. Según su luz libre, los puentes se clasifican en: pequeña, cuando la longitud entre apoyos es de hasta 15 metros; moderada, si se encuentra entre 15 y 40 metros; grande, si está entre 40 y 150 metros; e importante, si supera los 150 metros (Naaman, 2004).

Por otro lado, cuando depende de su función se denominarán viaductos si permiten el cruce de vehículos, pasarelas cuando está destinado al cruce peatonal, ferroviario si es para el paso de trenes y acueductos para el paso elevado de agua. Los

puentes para ductos se consideran puentes especiales, pues sustentan tuberías con fluidos de diversa índole (Hernández Ibáñez, 2002). En estos casos, la superestructura es más liviana que en otros puentes.

Cuando su clasificación está dada según el material de diseño se dividen en:

- *Puentes de mampostería de piedra*: son estructuras altamente rígidas, resistentes a compresión y duraderas frente a efectos climáticos. Se han empleado desde la antigüedad con diversos fines, uno de los más conocidos son los acueductos romanos con forma de arco. En la actualidad no se emplean con frecuencia debido al costo en la construcción y la necesidad de mano de obra calificada para su realización (Romo, 2009).



Ilustración 8. Acueductos romanos.

Recuperado de: Historia National Geographic

- *Puentes de madera*: por lo general son estructuras reticuladas que trabajan a tracción y compresión. Se consideran eficientes cuando las lucen son moderadas y las cargas livianas. Se construyen con rapidez y bajo presupuesto, si los materiales son de la zona de emplazamiento (Manzano & Pérez, 2012). En ellos es fundamental cuidar detalles del proceso constructivo, especialmente en las uniones. Su principal desventaja es la necesidad continuo mantenimiento para patologías por agentes climáticos (Grattersat, s/f).



Ilustración 9. Acueducto de madera sobre Festiniog Railway, Reino Unido.

Recuperado de: Geograph

- *Puentes de acero:* se diseñan con versatilidad como puentes sobre vigas metálicas, conformando armaduras. Alcanza grandes luces con un proceso constructivo corto que puede desarrollarse parcialmente fuera de la zona de emplazamiento (Hernández Ibáñez, 2002). Sus mayores limitantes son el costo de los materiales, la necesidad de mano de obra calificada y un mantenimiento constante para evitar la acción corrosiva (Romo, 2009).



Ilustración 10. Acueducto Pontcysyllte.

Recuperado de: Arquitectura en acero, s/f.

- *Puentes de hormigón armado:* son estructuras resistentes que permiten salvar luces moderadas de hasta 25 metros. Además, son considerablemente duraderas a factores ambientales (Manzano & Pérez, 2012). Tampoco son costosos ni requieren de mano de obra calificada o materiales importados que incrementen el costo.



Ilustración 11. Acueducto de Tardienta, España.

Recuperado de: Ayuntamiento de Tardienta, 2017.

- *Puentes de hormigón preesforzado*: el hormigón pretensado y postensado permite superar algunas limitaciones de los puentes de hormigón armado, como la reducción del peso propio para alcanzar mayores luces (Romo, 2009).



Ilustración 12. Acueducto Ringvaart Haarlemmermeer, Holanda.

Recuperado de: Prontubeam, 2017.

La categorización conforme al esquema estático se subdivide según su comportamiento como: vigas, en cantiléver, arco, colgante o atirantado (Servant, s/f). El uso de uno u otro tipo depende de las solicitaciones del puente como: luces, topografía, cargas de diseño, entre otros. A continuación, se presentan cada uno de ellos:

- *Puente de vigas*: se conforma por elementos horizontales apoyados en pilares. La fuerza transmitida a los soportes es gravitacional, por lo que sus esfuerzos son de compresión, mientras que las vigas trabajan a flexión (Manzano & Pérez, 2012).



Ilustración 13. Puente García Morato.  
Recuperado de: El Norte de Castilla, 2007.

- *Puente en cantiliver*: se conforma por una viga continua con articulaciones que actúa como isostática, por lo que actúa como una viga simplemente apoyada que en sus extremos está prolongada por ménsulas (Ezquerro, 2016).



Ilustración 14. Forth Bridge, Reino Unido.  
Recuperado de: The Times, 2020.

- *Puente de arco*: contiene una sección curva apoyada en estribos que alcanza el claro solicitado. Cuando el arco se sitúa bajo el tablero, se requieren apoyos auxiliares; no obstante, cuando cuelga del arco, se requieren obenques (Romo, 2009).



Ilustración 15. Puente arcos de Alconetar, embalse de Alcántar.  
Recuperado de: OHL, 2016.

- *Puente colgante*: consta de una serie de péndolas suspendidas de un cable principal, el cual está sujeto en sus extremos a torres que dan lugar a catenaria; mediante este sistema se soporta al tablero y las cargas que ejercen en él. Las principales acciones que se generan son tracción en los cables y compresión en los pilares. Las fuerzas en los pilares son gravitacionales y posteriormente, estabilizadas (Calderón, 2010).



Ilustración 16. Puente de la Bahía, San Francisco.

Recuperado de: autor desconocido.

- *Puente atirantado*: está conformado por tres componentes principales: tablero, torre y tirantes. El tablero está suspendido de uno o varios pilones o torres centrales mediante obenques o tirantes. La distribución de las cargas que soporta el tablero y su propio peso es transmitido a los tirantes, quienes a su vez transmiten las cargas a las torres y estas a la cimentación (Turkkan, 2006).



Ilustración 17. Puente de Tatara, Japón.

Recuperado de: autor desconocido.

## 2.3. INTRODUCCIÓN A LOS PUENTES ATIRANTADOS

Los puentes atirantados son estructuras estáticamente indeterminadas cuyo comportamiento está influenciado por la disposición de los cables y la distribución de las rigideces en los tirantes, pilones y tablero (Yazdani-Paraei, Moharrami, Maalek, & Heydari, 2015). El soporte son sus torres y a ellas se encuentran anclados a distintos niveles los cables principales, de los cuales está suspendido el tablero. Por su forma, tamaño y método constructivo permiten alcanzar luces entre 100 y 500 metros (Carrión, Hernández, & Terán, 2005).



Ilustración 18. Puentes atirantados.

Recuperado de: González, 2016, pág. 55.

Se caracterizan por su alta hiperestaticidad y flexibilidad como resultado de los claros que salvan, características que se agudizan durante su construcción, por lo que es necesario hacer un análisis de efectos de segundo orden (Cámara, 2011). A partir de este tipo de análisis, se contemplan las deformaciones o desplazamientos resultantes de la combinación de cargas verticales y horizontales que actúan en el paso elevado (Hosam-Eddin & Abdel-Gaffar, 1995).

## 2.4. SISTEMAS DE OBEQUES

Los obenques, tirantes o cables principales son elementos hechos con acero de alta resistencia que están anclados a la torre y de los cuales está suspendido el tablero. La forma que adoptan en diagonal genera una componente horizontal y otra vertical que proporcionan una compresión la cual permite reducir el espesor del tablero (Naaman, 2004).

Estos tensores se encuentran anclados en la plataforma a una distancia de entre 5 a 20 metros, por lo que la flexión local en cada dovela es despreciable con respecto a la flexión global del puente. Esto se debe a que los obenques actúan como apoyos cuasi-continuos y elásticos que reducen la luz libre (Manzano & Pérez, 2012).

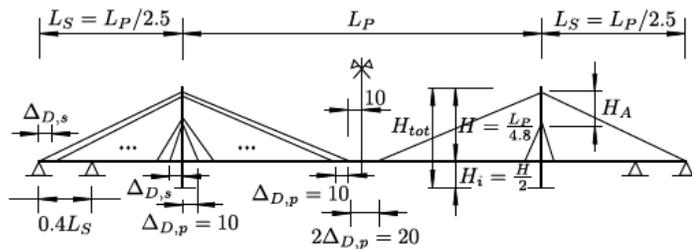


Ilustración 19. Elevación esquemática de un puente atirantado.

Recuperado de: Cámara, 2011, pág. 81.

Hay dos sistemas de cables básicos: el sistema de ventiladores, en el que los tirantes se irradian desde la parte superior de la torre y el sistema de arpa en el que los cables están paralelos y fijos a diferentes alturas de la torre. En proyectos recientes, se combinan estos sistemas de modo que los puntos de anclaje en la torre son lo suficientemente dispersos para separar el anclaje de cada cable (Torneri, 2002).

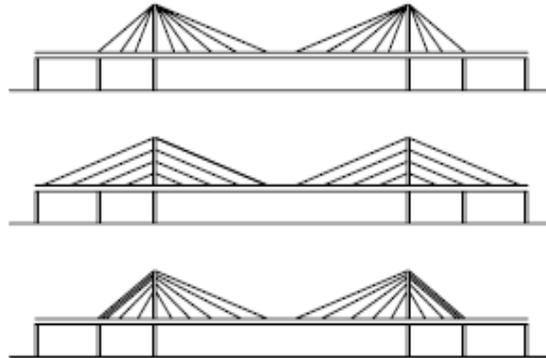


Ilustración 20. Sistemas de cables para puentes atirantados: sistema de ventilador, de arpa, de cable arpa modificada.

Recuperado de: Gimsing, 1983.

#### 2.4.1. ESTABILIDAD

Los sistemas de cables son elementos importantes en el diseño de puentes atirantados, pues determinan su comportamiento estructural (Gimsing, 1983). Según su estabilidad se dividen en tres grupos:

- Cables estables de primer orden:* equilibrio sin necesidad de desplazamientos.
- Cables estables de segundo orden:* el equilibrio se logra si existen desplazamientos nodales como sucede en los sistemas de suspensión.
- Inestables:* sistemas de cable aislado que no son estables por falta de apoyos.

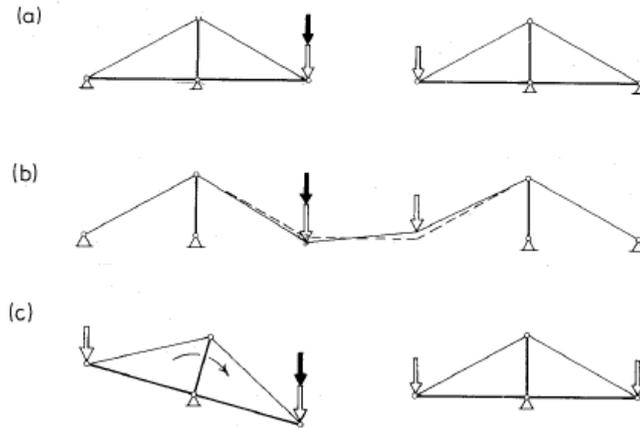


Ilustración 21. Sistemas de cables según su estabilidad.  
Recuperado de: Gimsing, 1983.

El sistema de cables ventilador es un estable de primer orden, pues la fijación de los tirantes en la parte superior de la torre asegura que las componentes horizontales de las fuerzas se transfieran al cable de anclaje. Para que la estabilidad se mantenga al tirar del cable de anclaje, las proporciones entre el vano central y lateral deben ser las adecuadas para que cargas variables provoquen el alivio completo de la línea de fondeo en el vano lateral (Torneri, 2002).

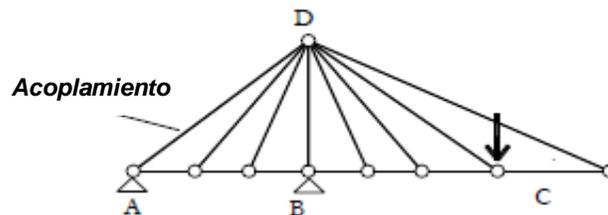


Ilustración 22. Sistema de cables con configuración de ventilador.  
Recuperado de: Torneri, 2002.

El sistema de cables de arpa es inestable, en consecuencia, las rigideces de flexión del tablero y la torre deben compensar esta deficiencia mediante desplazamientos (Torneri, 2002). El único sistema parcial de primer orden es el que conforman los cables  $A_0BCD_0$  en la Ilustración 23.

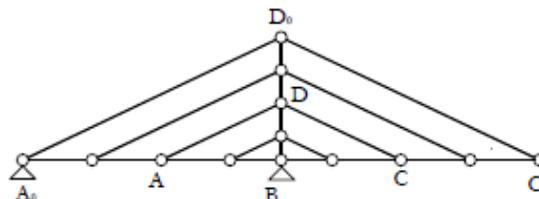


Ilustración 23. Sistema de cables en arpa.  
Recuperado de: Torneri, 2002.

Los puentes atirantados tienen una capacidad portante satisfactoria, aunque el sistema de cable es inestable. Sin embargo, los puentes con los sistemas de cables estables de primera clase tienen ventajas estructurales en rigidez y capacidad de carga (Gimsing, 1983).

## 2.4.2. CONFIGURACIÓN LONGITUDINAL

### 2.4.2.1. Sistema de arpa

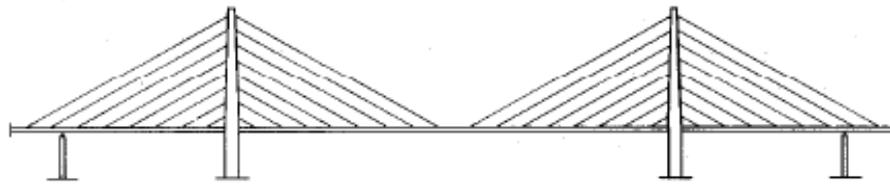


Ilustración 24. Sistema de arpa de cables múltiples, torre rígida y soportes laterales desplazados a los extremos. Recuperado de: Gimsing, 1983.

Pese a ser estáticamente más atractivo por tener obenques paralelos con una apariencia más libre, su comportamiento estructural y costo le convierten en una opción poco favorable (Walther R. , 1985). Un sistema de arpa, con soportes dispuestos debajo de las torres y en los extremos dos vanos laterales es un sistema de cables inestable. De esta forma, con las rigideces a flexión de la torre y tablero se garantiza el equilibrio estable.

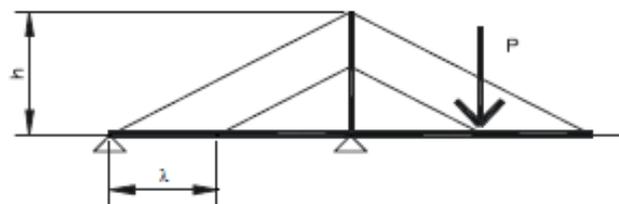


Ilustración 25. Modelo de sistema de arpa con dos pares de baquetas. Recuperado de: Gimsing, 1983.

La estabilidad se puede lograr a través de dos sistemas estructurales: con tablero rígido y torre esbelta o al revés, incluyendo a todas las posibilidades intermedias en las que la distribución de momentos es proporcional a la rigidez de los elementos estructurales. Cuando la torre tiene menor rigidez, los momentos flectores estarán en el tablero; mientras que, si la rigidez es mayor en el tablero, la torre tendrá momentos por flexión.



Ilustración 26. Momentos según la rigidez.

Recuperado de Gimsing, 1983.

#### 2.4.2.2. Sistema semi – arpa

Si bien mantiene un parecido con el sistema de arpa, su principal diferencia es que el sistema de cables no es paralelo, por lo que la distribución de cargas es mejor conforme aumenta la altura y rigidez de la torre (Manzano & Pérez, 2012).

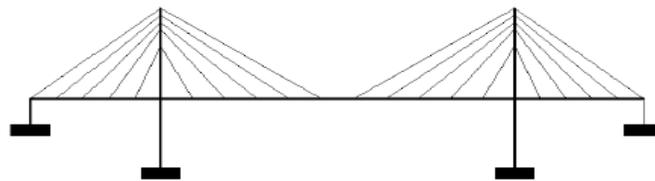


Ilustración 27. Sistema semi – arpa.

Recuperado de: Manzano y Pérez, 2012.

El cambio del sistema de cables también cambia la relación entre la variación de la tensión del cable y la deflexión del tablero, especialmente al comparar con el sistema de arpa. Esta diferencia implica que la longitud del vano central con respecto a los laterales también es distinta (Huang, Wang, Fu, Liu, & Gao, 2018).

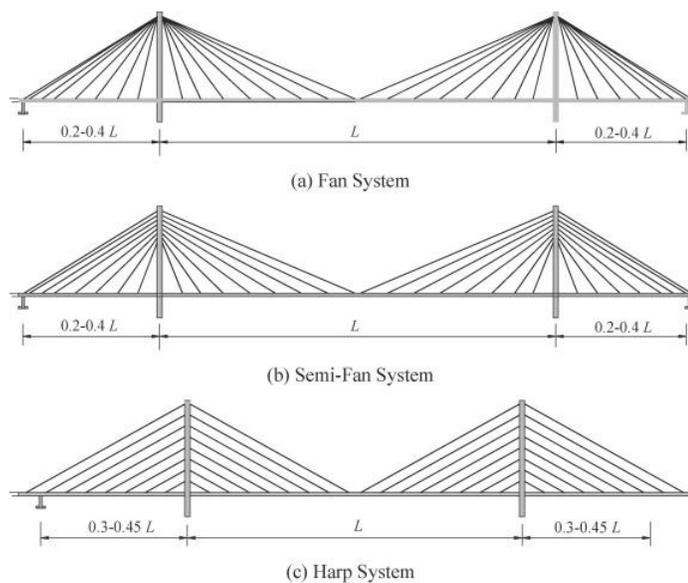


Ilustración 28. Longitudes de vanos.

Recuperado de: Huang, Wang, Fu, Liu & Gao, 2018.

#### 2.4.2.3. Sistema asimétrico

Este sistema tiene parecido con el sistema de arpa, sin embargo, su diferencia radica en que sus cables no son paralelos y tampoco cuentan con una distribución uniforme entre sí (Manzano & Pérez, 2012).

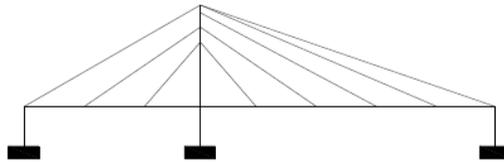


Ilustración 29. Sistema asimétrico.  
Recuperado de: Manzano y Pérez, 2012.

#### 2.4.2.4. Sistema de abanico

Aunque este sistema no se considere estético por el cruce de los obenques, presenta muchas ventajas en su comportamiento estructural. La principal diferencia es el peso, pues el ángulo que forman los obenques con respecto al tablero es mayor, por ende, la tensión es menor requiriendo diámetros de cables más pequeños (Souza, 1984).

Este mismo ángulo reduce la normal en el tablero y, por lo tanto, se necesita de un tablero con menor espesor. Finalmente, los desplazamientos de la torre y el tablero son menores que en el sistema de ventilador (Walther R. , 1985).

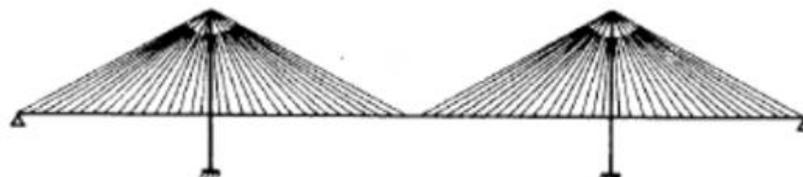


Ilustración 30. Sistema de abanico.  
Modificado de: Gimsing, 1983.

En el sistema de abanico, cuando el tramo lateral es inferior a la mitad del tramo central, los esfuerzos entre tramos se transfieren al cable de anclaje, evitando así la flexión excesiva de la torre o del tablero. Mediante la reducción de la luz lateral, se obtiene la estabilidad proporcionada por el pión antes el cierre del vano central en la fase de construcción de balances sucesivos (Gimsing, 1983).

Otra gran ventaja de este sistema es su mayor flexibilidad horizontal, lo cual aumenta su estabilidad frente a cargas sísmicas. Esto se debe a que cuanto mayor sea

la inclinación de los cables, menor es la restricción ofrecida a los desplazamientos horizontales (Torneri, 2002).

Las disposiciones estructurales de los cables se plantean de distintas maneras, sin embargo, cada una de ellas es favorable para uno u otro método. De la ilustración que sigue, las soluciones (a) y (b) requieren de tramos poco espaciados entre cables, puesto que no existen obenques intermedios en el vano lateral (Ndoye, 2004).

Los casos (a) y (c) permiten la construcción de accesos curvos después del pilón, mientras que en los casos (b) y (d) no es posible puesto que las componentes horizontales de las tensiones en el tramo lateral introducirían esfuerzos horizontales en el tramo central que no podrían ser compensados (Gimsing, 1983).

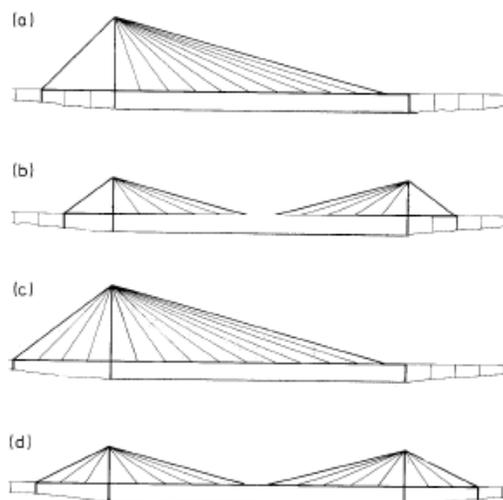


Ilustración 31. Disposiciones estructurales para el sistema de cables de abanico.  
Recuperado de: Gimsing, 1983.

Las condiciones topográficas y la luz libre son factores decisivos al determinar la configuración longitudinal de los cables. La elección de la pendiente depende de las condiciones geológicas y geotécnicas de la región de anclaje. Para reducir las dimensiones de los elementos estructuras de anclaje es necesario reducir el ángulo de inclinación de los pilones de anclaje, para disminuir la componente vertical de la fuerza de los tirantes (Turkkan, 2006).

#### 2.4.2.5. Sistema de cable de tramo múltiple

El principal problema relacionado con este sistema es su comportamiento estático en sentido longitudinal bajo carga asimétrica, pues el sistema de cable interno es

inestable al no restringir giros en los puntos O de la Ilustración 32. Los tableros son muy delgados y no poseen apoyos intermedios fijos, de manera que no es posible que el sistema sea estable solo con cables de anclaje, por lo que solo la torre puede garantizar estabilidad general al sistema estructural (Walther R. , 1985).

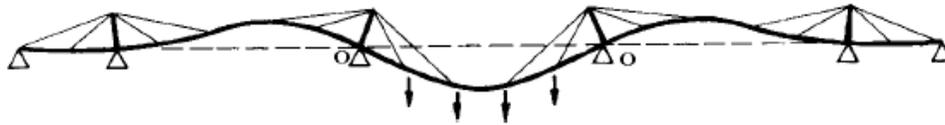


Ilustración 32. Sistema de cables en múltiples tramos.

Recuperado de: Gimsing, 1983.

Como alternativa, se establece una conexión horizontal en la cima de las torres con un cable de anclaje unido a las estructuras extremas de anclaje, no obstante, esta solución fue poco utilizada por factores estéticos. Sin embargo, siguen siendo necesarios elementos muy rígidos para que los desplazamientos sean similares a los existentes en una estructura con cables de anclaje (Torneri, 2002). Una alternativa que garantiza la rigidez y el mantenimiento de secciones transversales aún esbeltas es la adopción de torres en forma de A como en el puente General Rafael Urdaneta en Maracaibo, Venezuela (Fernández, 1962).



Ilustración 33. Puente General Rafael Urdaneta.

Recuperado de: García, 2017

### 2.4.3. CONFIGURACIÓN TRANSVERSAL

#### 2.4.3.1. Sistemas con suspensión central

La presencia de un único sistema de suspensión evita el cruce visual de cables, dando al puente una ventaja estética, pese a ello, desde un punto de vista estático, no es la mejor solución (Souza, 1984).

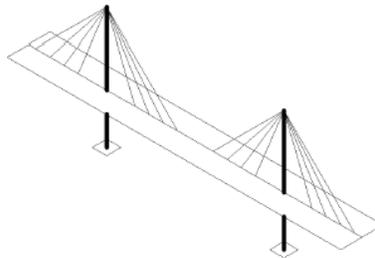


Ilustración 34. Puente de suspensión central.

Recuperado de: Manzano y Pérez, 2012.

Los momentos de torsión que actúan sobre el tablero, provocados por cargas asimétricas, requieren una sección rígida en la que puedan ser resistidos. Para aprovechar la rigidez del tablero, es necesario que el sistema de cables esté espaciado. Varios estudios han demostrado que incrementar la rigidez del tablero no reduce significativamente sus desplazamientos, ya que dependen de la rigidez de la torre y el sistema de cables (Walther R. , 1985).

#### 2.4.3.2. Sistemas con suspensión lateral

En sistemas con dos planos de cables, los momentos de torsión se equilibran por el principio del brazo de palanca, si la rigidez torsional del tablero es insignificante. Cuando existen momentos torsionales elevados es necesario emplear dos planos de cable y secciones transversales con una rigidez considerable a la torsión, con el fin de reducir la variación de fuerza en los tirantes mediante la mejor distribución de esfuerzos, evitando problemas de fatiga (Torneri, 2002).

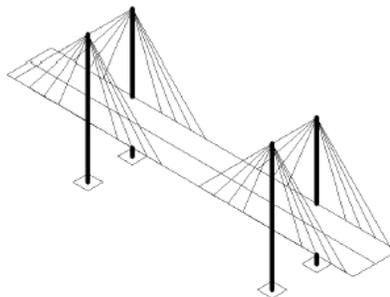


Ilustración 35. Puente de suspensión lateral.

Recuperado de: Manzano y Pérez, 2012.

La suspensión lateral introduce momentos flectores transversales con valor máximo en el centro de la sección y fuerzas de corte y fuerzas de anclaje máximas en los puntos extremos. En esta región extrema, se debe tener mucho cuidado al detallar los anclajes, ya que pueden interferir con el anclaje de un posible pretensado transversal (Souza, 1984).

#### 2.4.3.3. **Sistemas de suspensión en tres planos**

En este caso, la suspensión está dada en tres planos, por lo que los momentos de torsión, de igual manera se equilibran por el principio del brazo de palanca, si la rigidez torsional del tablero es insignificante. Este sistema se conforma por la combinación del sistema central y de suspensión lateral (Souza, 1984).

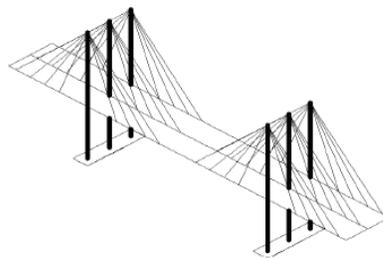


Ilustración 36. Puente de suspensión en tres planos.  
Recuperado de: Manzano y Pérez, 2012.

## 2.5. **TORRES O PILONES**

El comportamiento de la torre depende de las conexiones tablero – sistema de cables y otras condiciones vinculantes. En sistemas de arpa, las cargas se equilibran con la flexión de la vista longitudinal de la torre y alta rigidez en ella (Walther, Houriet, Isler, & Moia, 1988).

Por otro lado, en sistemas de abanico, los cables confieren la rigidez suficiente mediante los apoyos elásticos que forman en la cima de la torre, por lo que su rigidez no influye en gran medida. Este caso, las secciones dependen de la estabilidad transversal (Torneri, 2002).

## 2.5.1. CONFIGURACIÓN LONGITUDINAL

### 2.5.1.1. Torre lateral

En este caso, la torre se encuentra fuera del plano longitudinal del tablero, la ventaja de este tipo de torres que permiten la oblicuidad del tablero, así como conceptos arquitectónicos (Santos, 2011).



Ilustración 37. Puente Rey David, Jerusalén.

Recuperado de: Saifi & Hürol, 2018.

### 2.5.1.2. Torre asimétrica

La torre se encuentra inclinada hacia un extremo hasta dónde llega el sistema de tirantes. La fuerza de los obenques se compensa en contrapesos que forman parte de la subestructura. En ocasiones, los cables se sustituyen por pilares de hormigón pretensado que trabajan a compresión (Sanchez de León, Bernal, & Sanchez de León, 2012).



Ilustración 38. Puente de Talavera, España

Recuperado de: Sanchez de León, Bernal & Sanchez de León, 2012.

### 2.5.1.3. Torre en contrapeso

En este tipo de puentes, los tirantes se anclan a la torre y esta a su vez en el terreno.



Ilustración 39. Puente del Alamillo.

Recuperado de: García, 2017.

## 2.5.2. CONFIGURACIÓN TRANSVERSAL

### 2.5.2.1. Torres de un solo mástil.

Esta solución se utiliza generalmente en puentes pequeños y medianos. En luces mayores se puede llevar a cabo una vez que se ha reducido la esbeltez transversal de la torre por el efecto estabilizador de los cables (Poldolny Walter, 1976).

En el caso de torres con grandes secciones transversales, para evitar aumentar el ancho del tablero debido al paso de la torre por el tramo, es habitual emplear la configuración que se muestra en la Ilustración 40, donde a la vez se aumenta la estabilidad transversal. Esta solución presenta limitaciones económicas y estéticas (Walther, Houriet, Isler, & Moia, 1988).



Ilustración 40. Torre con configuración de Y invertida.

Recuperado de: Walter, 1985.

Una alternativa poco utilizada pero perfectamente viable es la aplicación de dos planos inclinados de cables con una sola torre de mástil, como se muestra en la Ilustración 41. En este caso, la estabilidad transversal está garantizada por los cables de anclaje y la rigidez transversal de la torre se puede mantener baja (Torneri, 2002).

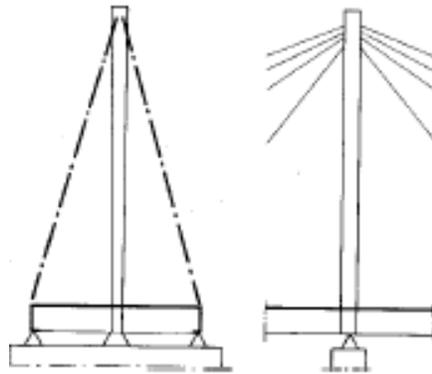


Ilustración 41. Torre de un solo mástil y dos planos de cable inclinados.

Recuperado de: Gimsing, 1983.

### 2.5.2.2. Torres con dos mástiles.

En estructuras de tamaño moderado, la torre puede estar formada por dos mástiles independientes como la imagen 42 (a). En esta configuración se recomienda alinear el plano del cable con el eje del mástil, para evitar la introducción de flexión sección transversal en la torre y grandes desplazamientos, que se acentúan por la fluidez (Torneri, 2002).

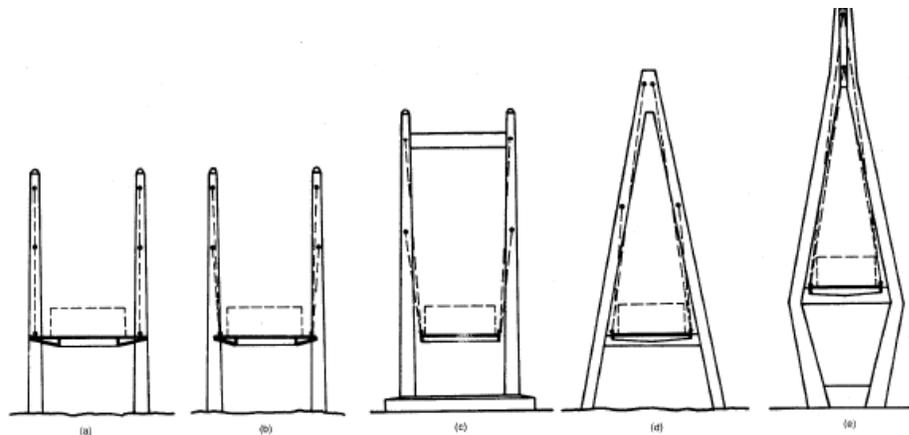


Ilustración 42. Configuraciones para torres con dos mástiles.

Recuperado de: Walter, 1985.

El tipo de torre por la cual se opte en un diseño depende del ancho del tablero, la altura de la torre, el claro del puente y sistema de cables, así como de la arquitectura de la estructura. Las torres más comunes con doble mástil tienen configuración en: mástiles independientes, triángulo y diamante (Morgenthal, 1999).

## 2.6. TABLERO

El tablero es la estructura destinada a resistir las componentes horizontales transmitidas por el sistema de cables. Las componentes de compresión que se producen tienen resultante nula, pues se equilibra en sí mismo (Manzano & Pérez, 2012).

En puentes atirantados, el tablero actúa principalmente en la transferencia local de cargas entre los puntos de aplicación y de soporte de los cables. De este modo, los esfuerzos de flexión no son grandes cuando los cables no están muy espaciados, lo que reduce la necesidad de secciones del tablero con alta rigidez a la flexión (Torneri, 2002).

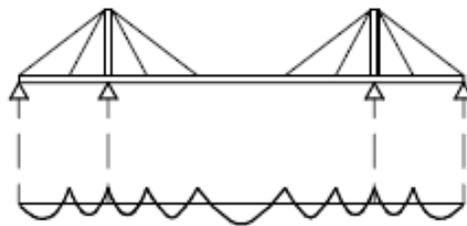


Ilustración 43. Diagrama de momentos flectores en puentes atirantados.

Recuperado de: Torneri, 2002.

Es preciso mencionar que el peralte depende del sistema de obenques adoptado, por lo que mientras mayor sea la distancia entre tirantes, mayor será el espesor que se requiera, pues estará sujeto a cargas y deformaciones mayores.

## CAPÍTULO III: Metodología

### 3.1. ESTADO ACTUAL

El GAD Municipal de Sucumbíos, como parte de su plan de desarrollo urbano, realizó en 2017 los estudios para la construcción del proyecto *Sistema de Agua potable de los recintos La Barquilla, Playas y Paraíso de la parroquia Rosa Florida* con el fin de ampliar la cobertura de servicios básicos y mejorar las condiciones de salubridad. Esta consultoría menciona la necesidad de un paso elevado sobre una falla geológica que comunique el sistema a los recintos La Barquilla y El Paraíso, mismo que no está desarrollado.

Los diseños de las estructuras hidráulicas tienen una vida útil de 25 años, sin embargo, los pasos elevados tienen un periodo de diseño de 75 años. Esta diferencia de 50 años indica la permanencia de la estructura en futuras ampliaciones.

Actualmente, la parroquia Rosa Florida cuenta con 426 habitantes que representan el 11% de la población total a nivel cantonal. Para 2040, cuando culmine el periodo de diseño de la red, la parroquia contará con 685 habitantes. La población para cuando culmine la vida útil del paso elevado será de 2790 habitantes.

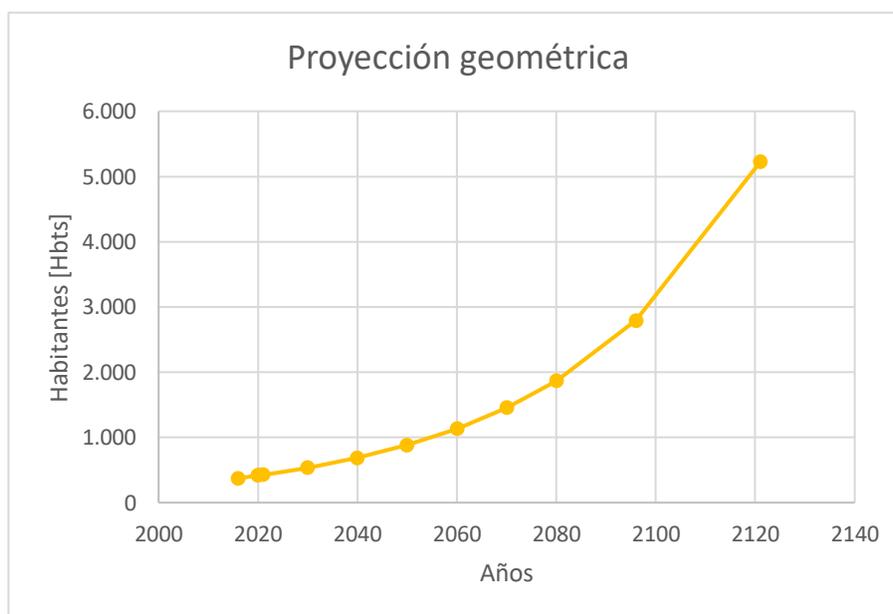


Ilustración 44. Proyección demográfica a nivel parroquial.

Fuente: propia.

## **3.2. ESTUDIOS PRELIMINARES**

El diseño de un paso elevado cuenta con informes previos acordes a la magnitud y complejidad del proyecto. Los estudios con los cuales se cuenta en este caso son:

- Topográficos
- Suelos
- Hidráulicos

Los mismos han sido realizados por el GAD Municipio de Sucumbíos y se detallan los aspectos más relevantes en cada uno en los apartados posteriores

### **3.2.1. ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS**

En ellos se incluye la planimetría, altimetría, informe y registro fotográfico que permiten definir la ubicación y luz libre de la estructura, condiciones de borde para el diseño.

En los planos topográficos, el abscisado se ha realizado cada 20 metros, las curvas de nivel principales cada 5 metros, mientras que las secundarias cada metro. Incluyen, además, 100 metros antes y después de cada acceso al paso elevado en sentido longitudinal y transversal. De igual manera, señala la vegetación existente, sus puntos de referencia, cotas y abscisas.

### **3.2.2. ESTUDIOS DE SUELOS**

El estudio determina las características físico-mecánicas del subsuelo en la zona de emplazamiento del paso elevado mediante la perforación de sondeos a percusión en cada sitio con ejecución de ensayos SPT, toma de muestras inalteradas y clasificación manual visual.

El alcance del estudio está limitado a determinar los parámetros de mecánica de suelos, necesarios para el diseño de las cimentaciones de las obras definidas. En él se establece que:

- El subsuelo está conformado por arcillas de baja plasticidad mediano contenido de humedad y de consistencia semidura a dura.
- En una profundidad de 2 a 6 metros no existe nivel freático.
- Densidad del suelo de 1.6 T/m<sup>3</sup>.
- Valores N de 15.

- Suelo tipo D.
- Fricción suelo – estructura ( $f_s$ ) de 1.5 T/m<sup>2</sup>.
- Coeficiente de balasto ( $k_s$ ) de 3000 T/m<sup>3</sup>.
- La capacidad portante de los suelos, en función de los resultados de los ensayos de penetración estándar (SPT) es de 18.75 (T/m<sup>2</sup>).

### **3.2.3. ESTUDIOS HIDRÁULICOS**

En estos estudios se presenta la dotación de agua potable para la comunidad La Barquilla, Playas y El Paraíso. Las bases de diseño consideran las Normas para el Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable. Los datos que se presentan son:

- Periodo de diseño
- Estudios demográficos
- Áreas de servicio y densidad poblacional
- Dotación de agua potable
- Variaciones de consumo
- Caudales de diseño
- Diseño del nuevo sistema de agua potable
- Administración del sistema

### **3.3. FILOSOFÍA DE DISEÑO Y NORMAS APLICADAS**

El diseño de los elementos estructurales que conforman un puente se ajusta al análisis de los estados de carga. Las cargas de diseño que actúan en el paso elevado corresponden a: carga muerta, carga viva, carga sísmica, carga de viento y cargas en el proceso constructivo (Morgenthal, 1999). La carga muerta contempla el peso propio de la estructura, incluyendo la tubería, mientras que la carga viva considera la carga del agua potable que cruza. La carga sísmica parte del análisis modal espectral, el cual depende de la zona de emplazamiento y características geológicas del terreno (NEC-SE-DS, 2015). Con respecto a la carga de viento, esta se ajusta a la velocidad de viento de la zona, así como a la altura que alcanza la estructura (NEC-SE-CG, 2015).

El diseño de estructuras en Ecuador se ajusta la NEC-SE donde las especificaciones para el diseño de puentes están basadas en la norma AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. El análisis de cargas permanentes y variables se describe en la NEC-SE-CG. El análisis modal espectral para estructuras de

ocupación especial, cuyo comportamiento dinámico es diferente, se describe en la NEC-SE-DS. En ella se indican los niveles de frecuencia y amenaza sísmica que se deben analizar en estos casos.

### **3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.**

#### **3.4.1. ELEMENTOS FINITOS**

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico de resolución de ecuaciones diferenciales que simplifica un sistema físico con infinitas incógnitas, en otro con incógnitas finitas que se relacionan entre sí. Este último sistema se representa en modelos matemáticos que tienen el mismo comportamiento que el sistema físico inicial. En ingeniería civil, el método de elementos finitos se aplica en el análisis de estructuras, donde los modelos son discretizados en subdominios denominados elementos finitos que se interconectan entre sí mediante nodos (Ros, 2019). Los nodos representan los valores aproximados entre los cuales se encuentra una variable continua, tales como: temperatura, desplazamiento, entre otros. Estas variables de estado corresponden a los grados de libertad que posee la estructura analizada (Vargas, 2010).

Los elementos finitos se discretizan en mallas, las cuales reflejan resultados más aproximados cuando existe una mayor cantidad de subdominios. Esto se debe a que los desplazamientos y esfuerzos de los elementos se expresan en función de los desplazamientos nodales, por lo que su comportamiento se acerca más a la realidad a medida que el análisis se divide en más nodos (Gabaldón, 2007).

Este método resuelve las matrices de rigidez de los elementos y las ensambla para obtener los desplazamientos en cada nodo y así comprender las tensiones y deformaciones que se generan dentro de cada elemento bajo ciertas sollicitaciones (Frías, 2004).

#### **3.4.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO**

Los modelos son representaciones tridimensionales de ecuaciones con sus correspondientes variables. En la actualidad, el análisis por elementos finitos se realiza mediante la modelación en programas de análisis estructural, uno de ellos es SAP2000 (Carrillo, González, & Velandia, 2006). Una característica importante del mismo es su capacidad para diseñar secciones bajo una variada posibilidad de normativas y estándares internacionales.

Cuando el análisis está en proceso, para encontrar una solución óptima, realiza una discretización del modelo. Este proceso consta de dos fases que interactúan entre sí: discretización nodo-elemento y discretización del modelo por elementos finitos (Rodríguez, Muñoz, & Núñez, 2007). En la primera fase, el programa identifica los elementos estructurales considerando las propiedades de sus materiales para simular el comportamiento físico de la estructura y aplicar el método matricial de la rigidez; de igual manera, considera las cargas asignadas y las condiciones de borde. En la segunda fase realiza el mallado que conecta los elementos por nodos cuyo comportamiento es acorde a las propiedades físicas de los materiales asignado (Animas, Pacheco, & Ortiz, 2014).

La modelación de puentes atirantados puede ser realizada mediante programas de cálculo estructural en tres dimensiones que utilicen elementos finitos, como es el caso de SAP2000. Mediante ellos es posible diseñar los elementos conforme a las normativas nacionales e internacionales que requiere una estructura. Además, facilita la modelación de variadas geometrías, la asignación de estados de carga, materiales y cálculo estructural de los mismos (Sarzuri, 2006).

## **CAPÍTULO IV: Análisis de cargas y modelación matemática**

El presente capítulo contiene el análisis de la carga muerta, viva, de viento, sísmica y temperatura; así como, la modelación de los componentes de la superestructura e infraestructura del puente, cuyo obstáculo es el cruce de un deslizamiento activo.

Como se había mencionado anteriormente, el puente tiene una luz total de 306 metros donde sus vanos laterales tienen una longitud de 63 metros y el vano central es de 180 metros. Al comienzo y fin del vano central se encuentra una torre con dos mástiles unidos y geometría tipo cono truncado, es decir con una configuración de dos mástiles, que soporta el tablero con un sistema de obenques en abanico en suspensión central.

El tablero adoptado corresponde a una tubería estructural de 5 pulgadas de diámetro en el cual está embebida la tubería de PVC proyectada a 75 años que tiene un diámetro de 110 mm. La altura a la que se va a encontrar el tablero con respecto al obstáculo, es decir el gálibo, es 7.5 metros.

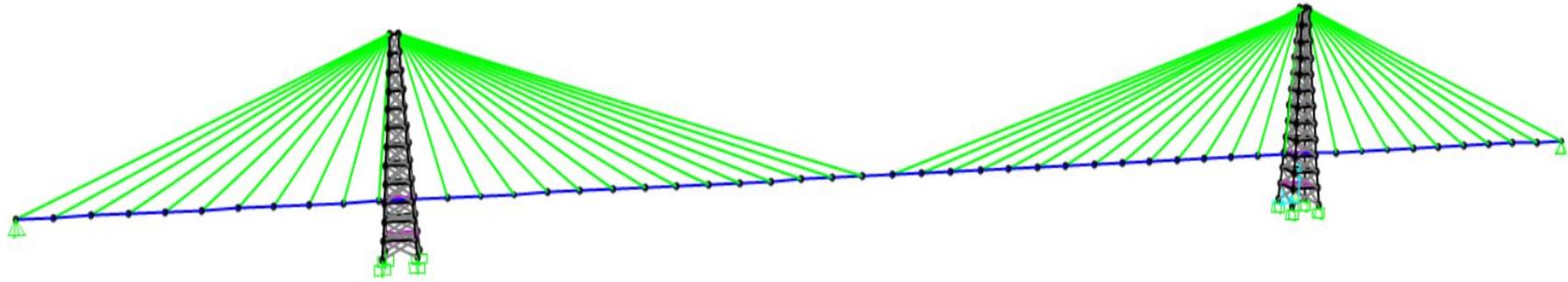


Ilustración 45. Vista 3D del modelo del paso elevado planteado.

Fuente: propia.

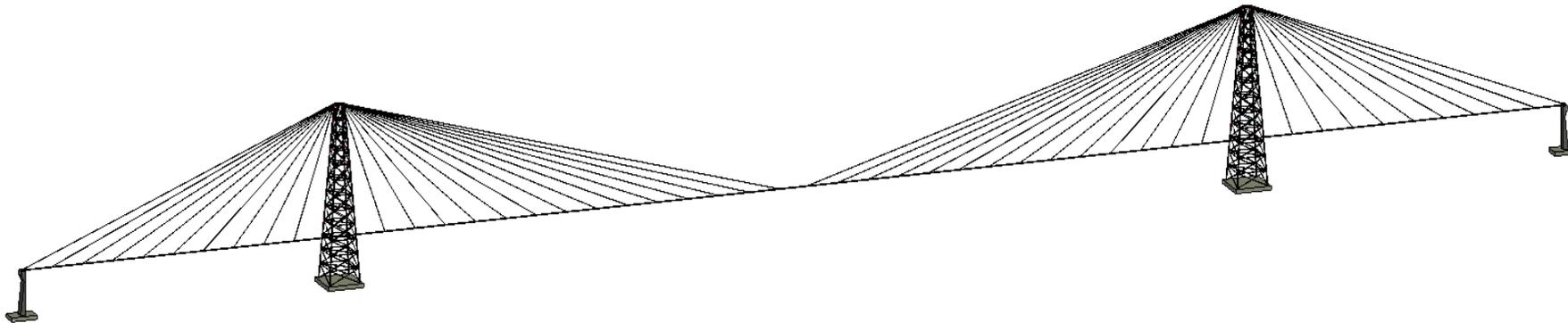


Ilustración 46. Vista 3D del plano del paso elevado planteado.

Fuente: propia.

## 4.1. ESTIMACIÓN DE CARGAS

### 4.1.1. ESTIMACIÓN DE LA CARGA MUERTA.

La carga muerta constituye el peso de los elementos estructurales y todo artefacto que se encuentre de forma definitiva y permanente en la estructura, en este caso correspondería a la tubería de conducción de agua potable, tablero, torres y obenques.

#### 4.1.1.1. Carga de elementos estructurales

Considerando que esta estructura será modelada en SAP2000, el cálculo del peso propio de la estructura es desarrollado por el programa y únicamente es necesario determinar la carga muerta de los elementos que no se han modelado, es decir, la carga de la tubería y sus conexiones.

#### 4.1.1.2. Carga de la tubería

Para la determinación de la carga de la tubería, previamente se define el diámetro requerido al final de la vida útil del paso elevado. La Tabla 1 presenta como *demanda* los resultados de los parámetros analizados a 25 y 75 años. Entre ellos se encuentra la población de diseño y las variaciones de consumo conformadas por el consumo máximo diario (CMD) y el consumo máximo horario (CMH). Los resultados a 25 años coinciden con los estudios hidráulicos.

Parámetro	Unidades	Demanda	
		A 25 años	A 75 años
Población de diseño	Habts	685	2790
Cmd (incluye pérdidas)	L/s	1.38	5.62
CMD	L/s	1.79	7.30
CMH	L/s	4.14	16.86
<u>Diámetro de la tubería</u>	<u>mm</u>	<u>75</u>	<u>110</u>

Tabla 1. Diámetro de la tubería a 25 y 75 años.

Fuente: propia

Como se observa en la Tabla 1, los cálculos indican que la tubería requerida a los 75 años es 110 mm. En las especificaciones técnicas del proyecto especifica que la tubería utilizada debe ser de PVC, por lo que las características consideradas son:

<b>Parámetro</b>		
Peso específico PVC	Kg/m <sup>3</sup>	1400
Espesor nominal	m	0.0042
Diámetro interior	m	0.1016
Diámetro exterior	m	0.11

Tabla 2. Datos para la determinación de la carga por la tubería.

Fuente: propia

Finalmente, la carga por metro lineal corresponde a:

<b>Parámetro</b>		
Área externa ( $A_e$ )	m <sup>2</sup>	0,0095
Área interna ( $A_i$ )	m <sup>2</sup>	0,0081
Área neta ( $A_t$ )	m <sup>2</sup>	0,0014
Volumen ( $V$ )	m <sup>3</sup>	0,4273
Peso ( $W$ )	Kg	598,24
Peso por metro de tubo	Kg/m	1,95

Tabla 3. Carga de la tubería.

Fuente: propia

#### 4.1.1.3. Carga de las conexiones

El peso de las conexiones requeridas en la tubería se estima como un 4% de la carga de la tubería empleada (Jiménez, 2007). De manera que, la carga por metro cuadrado es 0.08 Kg/m.

#### 4.1.1.4. Carga muerta total

Los resultados obtenidos anteriormente indican que la carga muerta, sin incluir su peso propio, es 2.03 Kg/m.

Peso de la tubería por metro lineal	Kg/m	1,95
Peso de las conexiones por metro lineal	Kg/m	0,08
<b>Peso de la Carga Muerta</b>	<b>Kg/m</b>	<b>2,03</b>

Tabla 4. Carga muerta (sin incluir el peso propio) del puente.

Fuente: propia.

#### 4.1.2. ESTIMACIÓN DE LA CARGA VIVA.

Las sobrecargas consideradas en el cálculo dependen de la ocupación de la estructura, en este caso, corresponde a la carga del agua que circula por la tubería. El respectivo resultado se presenta en la tabla que sigue:

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Peso específico agua	Kg/m <sup>3</sup>	1000
Volumen (V)	m <sup>3</sup>	2,48
Peso (W)	Kg	2481,65
<b>Carga viva (agua)</b>	<b>Kg/m</b>	<b>8,11</b>

Tabla 5. Carga viva.

Fuente: propia

#### 4.1.3. ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE VIENTO.

En la provincia de Sucumbíos existen dos estaciones meteorológicas del INAHMI cerca al proyecto: La Bonita y Lumbaqui. En este caso, se adoptan los análisis realizados en la estación de Lumbaqui donde la velocidad del viento más alta se registró en el mes de septiembre, cuando alcanzó 21 m/s (2012).

A partir de esta información y conforme a la NEC-SE-CG se ha determinado la presión de viento a barlovento y sotavento, los cuales se presentan en la Tabla 6.

<b>Presión a barlovento</b>	16.52	Kg/m <sup>2</sup>
<b>Presión a sotavento</b>	-33.03	Kg/m <sup>2</sup>

Tabla 6. Carga de viento.

Fuente: propia

#### 4.1.4. ESTIMACIÓN DE CARGA POR TEMPERATURA

Este análisis se realiza en función a las propiedades de los obenques, a partir de las cuales se determinan las variaciones de temperatura necesarias para tesar los tirantes y que puedan soportar las respectivas cargas. Este es un proceso iterativo que culmina cuando las deformaciones tablero – tirante y obenque – torre se aproximan o son cero.

La gradiente de temperatura provoca una variación en la longitud de los tirantes, la cual se determina con la siguiente expresión:

$$\delta = \alpha * l * \Delta T$$

Donde,

$\delta$ : deformación

$\alpha$ : coeficiente de expansión térmica

$l$ : longitud del tirante

$\Delta T$ : gradiente térmico

#### 4.1.5. ESTIMACIÓN DE LA CARGA SÍSMICA.

En este análisis se considera un factor Z de 0.3 en función a la zonificación sísmica, así como un suelo tipo D, debido a los análisis que presenta el estudio de suelos y que se indica en la metodología.

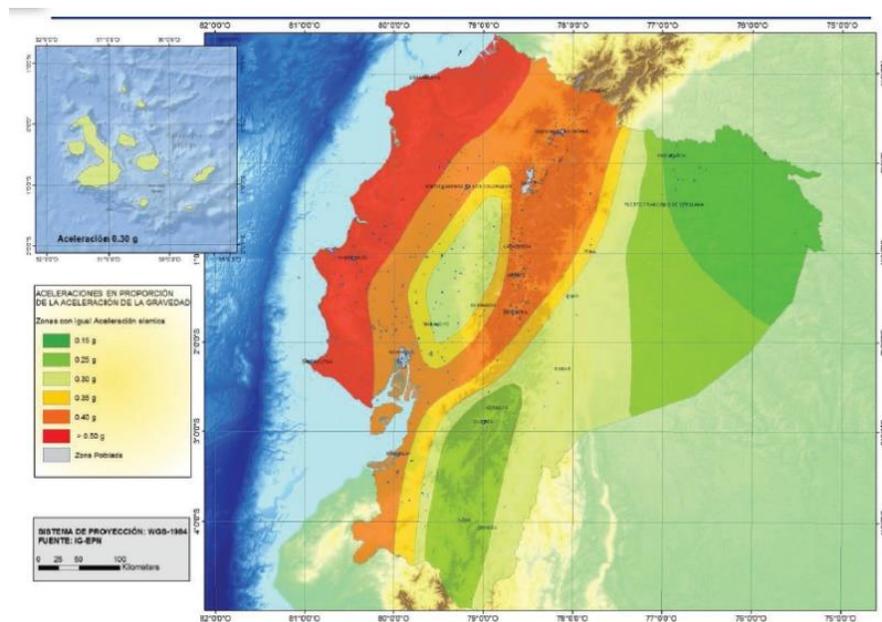


Ilustración 47. Zonificación sísmica de Ecuador.

Recuperado de: NEC-SE-DS, 2015.

<i>Coefficientes de perfil de suelo</i>	
Amplificación del suelo en la zona de período corto ( $F_a$ )	1,3
Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca ( $F_d$ )	1,36
Comportamiento no lineal de suelos ( $F_s$ )	1,11

Ilustración 48. Geología local.

Fuente: propia.

El espectro de diseño que se presenta a continuación se basa en las condiciones geológicas, geotécnicas y sísmicas del paso elevado. A continuación, se presenta el espectro elástico e inelástico considerando una fracción de amortiguamiento con relación al crítico del 5%, mediante ellos se representan los efectos dinámicos del sismo de diseño.

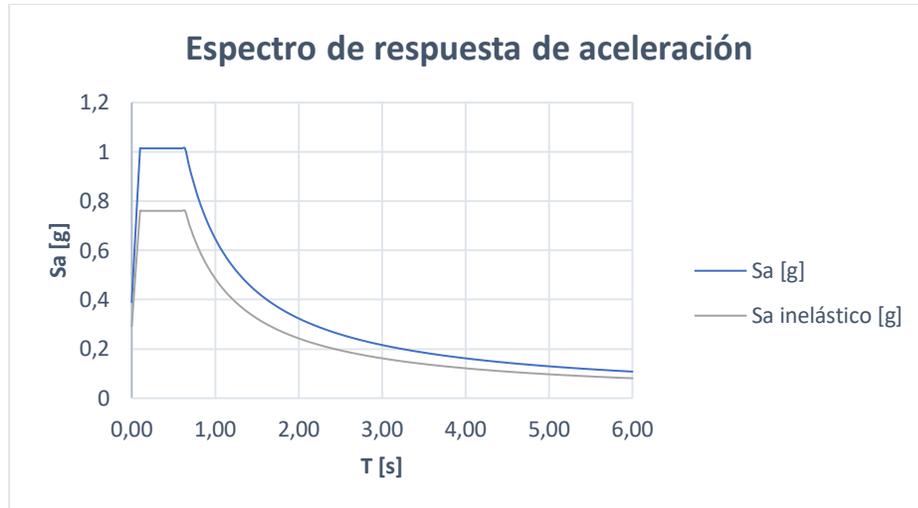


Ilustración 49. Espectro de diseño.

Fuente: propia.

<i>T [s]</i>	<i>Sa [g]</i>	<i>Sa inelástico [g]</i>
0,00	0,39	0,293
0,10	1,014	0,761
0,116	1,014	0,761
0,20	1,014	0,761
0,30	1,014	0,761
0,40	1,014	0,761
0,50	1,014	0,761
0,60	1,014	0,761
0,639	1,014	0,761
0,70	0,925	0,694
0,80	0,810	0,607
0,90	0,720	0,540
1,00	0,648	0,486
1,10	0,589	0,442
1,20	0,540	0,405
1,30	0,498	0,374
1,40	0,463	0,347
1,50	0,432	0,324
1,60	0,405	0,304
1,70	0,381	0,286
1,80	0,360	0,270
1,90	0,341	0,256
2,00	0,324	0,243
2,10	0,308	0,231
2,20	0,294	0,221

Tabla 7. Periodo vs aceleración elástica e inelástica de piso.

Fuente: propia.

<b>H [m]</b>	22,50
<b>C<sub>t</sub></b>	0,047
<b>α</b>	0,9
<b>T<sub>c</sub> [s]</b>	0,77
<b>T<sub>c</sub> admisible [s]</b>	1,08
<b>T SAP200 [s]</b>	0,933

Tabla 8. Periodo de la estructura.

Fuente: propia.

#### 4.1.6. COMBINACIONES DE CARGAS.

Las combinaciones de cargas se basan en las mencionadas por la norma AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, las cuales se resumen en la Tabla 9.

Los estados límite de carga que se consideran en este análisis son: Resistencia, Evento Extremo, Servicio y Fatiga.

Table 3.4.1-1—Load Combinations and Load Factors

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time				
										EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	$\gamma_p$	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength II	$\gamma_p$	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength III	$\gamma_p$	—	1.00	1.00	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength IV	$\gamma_p$	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Strength V	$\gamma_p$	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Extreme Event I	1.00	$\gamma_{EQ}$	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—
Extreme Event II	1.00	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	$\gamma_{LL}$	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00	1.00/1.20	—	1.00	—	—	—	—	—
Fatigue I— LL, IM & CE only	—	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue II— LL, IM & CE only	—	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla 9. Combinaciones de carga.

Recuperado de: AASHTO, 2017.

Donde las cargas permanentes que usa la norma son:

CR: creep

EH: empuje horizontal del suelo.

DD: fricción negativa

EL: tensiones residuales.

DC: carga muerta.

ES: sobrecarga del suelo.

DW: sobrecarga.

EV: presión gravitacional peso propio.

BR: fuerza de frenado.

PS: fuerzas de pretensado.

Las cargas temporales que considera esta norma son:

CE: fuerza centrífuga.

CT: fuerza de colisión vehicular.

CV: colisión de una embarcación.

EQ: sismo.

FR: efectos de fricción.

IC: carga de hielo

IM: incremento por carga vehicular.

LL: sobrecarga vehicular

LS: sobrecarga viva.

PL: sobrecarga peatonal.

SE: asentamiento.

TG: gradiente de temperatura.

TU: efectos de temperatura uniforme.

WA: carga hidráulica y presión de flujo.

WL: carga de viento sobre la sobrecarga

WS: carga de viento sobre la estructura.

De ellos, existen variables que no son consideradas en el paso elevado, puesto que está relacionados factores que influyen en puentes carreteros o ferroviarios. En este caso, se contemplan únicamente las cargas evaluadas y presentadas en apartados anteriores.

## **4.2. MATERIALES DE DISEÑO**

### **4.2.1. ACERO A36**

El acero está conformado a partir de la aleación de acero y carbón, este último en un porcentaje que se encuentra entre 0.05% y 2% como máximo. En ocasiones, existe la presencia de otros elementos como Cromo o Níquel con fines específicos (Manzano & Pérez, 2012).

El comportamiento de la estructura depende de la composición química, su proceso de fabricación (laminado), esfuerzos y tratamiento térmico del material de los perfiles de acero que se utilicen; es decir, de las propiedades químicas, mecánicas y físicas del material (Mendoza, Parodi, Toro, & Rivera, s/f).

El acero A36 es al Carbono, tienen presencia de carbón en 1.7%, manganeso en 1.65%, silicio y cobre en 0.6%, cada uno (Mendoza, Parodi, Toro, & Rivera, s/f). Se encuentran en formas como perfiles, barras y placas, las cuales se utilizan en edificios, puentes u otras estructuras articuladas o soldadas. En este caso, se ha utilizado este material en los perfiles de acero que conforman las torres del puente (McCormac, 2012).

La densidad del acero es de 7800 kg/cm<sup>3</sup>, su esfuerzo mínimo de fluencia (Fy) es 36 Ksi con una resistencia mínima especificada a tensión (Fu) entre 58 y 80 Ksi (McCormac, 2012).

### **4.2.2. ACERO A709 GRADO 50**

Este tipo de acero se caracteriza por tener una baja aleación de carbono que se combina con bajos porcentajes de níquel y cromo. Se caracteriza por su alta resistencia a tracción, por lo que es muy común su uso en puentes, vigas soldadas, edificios, grúas, equipos mecánicos, material rodante, pilotes, tanques, entre otros (Mendoza, Parodi, Toro, & Rivera, s/f).

Los distintos grados que se determina a través de la prueba de Charpy, se relacionan con la zona específica o menor temperatura de servicio prevista. En el caso

de puentes, también se miden conforme a la Especificación AASHTO M270 Grado 50 (Chapel Steel, s/f).

El acero A709 Gr 50 tiene límite de fluencia ( $F_y$ ) 50 Ksi, resistencia mínima especificada a tensión ( $F_u$ ) 65 Ksi y elongación mínima entre 16% y 19% (Mendoza, Parodi, Toro, & Rivera, s/f). A continuación, se presenta un cuadro comparativo de las propiedades mecánicas de las tipologías de acero utilizadas en el diseño del paso elevado:

	A36	A709 Gr 50
<i>Densidad del acero [kg/cm<sup>3</sup>]</i>	7800	
<i>Esfuerzo mínimo de fluencia (<math>F_y</math>) [ksi]</i>	36	50
<i>Resistencia mínima a tensión (<math>F_u</math>) [ksi]</i>	58 - 80	65
<i>Elongación mínima [%]</i>	23	16 - 19

Tabla 10. Tipologías de acero empleadas en el diseño.

### 4.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS OBENQUES

#### 4.2.3.1. Componentes del cable

Los tirantes son elementos constituidos por alambres en forma de hélice que conforman torones, los cuales son cableados alrededor de un centro de fibra o acero (Emcocables, s/f). La cantidad de torones depende de las propiedades que se requiera, especialmente con relación a la rigidez y tensión, factores que están directamente relacionados con el comportamiento del puente.

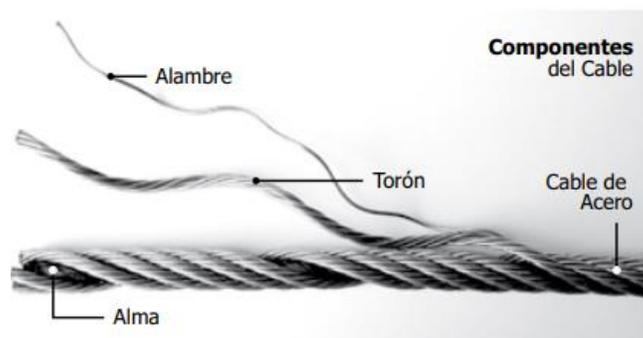


Ilustración 50. Constitución de cables.

Recuperado de: Emcocables, s/f.

#### 4.2.3.2. Alambres

Se dan lugar al estirar el alambroón, proceso mediante el cual se reduce su diámetro. Este mecanismo se consigue mediante la aplicación de una fuerza axial al alambroón mientras pasa por dados o matrices (Emcocables, s/f).

Sus propiedades dependen de la composición química, tamaño del grano, segregaciones, microestructura, inclusiones y proceso de fabricación, las cuales cumplen con las normas ASTM A 1007, JIS G 3525, API 9 A, RRW 410 F e ISO 2232 (Emcocables, s/f).

#### 4.2.3.3. Torones

Se conforman por alambres de iguales o distinto diámetro, los cuales se encuentran trenzados en espiral alrededor del alma central en capas. El número y disposición de alambres por capa se conoce como construcción (Naaman, 2004). Los alambres se giran en el mismo sentido de manera uniforme y paralela para evitar cruces y roces en capas interiores que debiliten los alambres y provoque su fallo antes de lo previsto. Los torones cuentan con un recubrimiento de Zinc o polietileno de alta densidad según la aplicación que tengan (Manzano & Pérez, 2012).

La clasificación de los torones depende de distintos parámetros como diámetro, cantidad de alambres, alma y construcción; a continuación, se presentan algunas de ellas:

##### a) Capa simple

Se conforma por un alambre central y seis del mismo diámetro enrollados alrededor del núcleo sin recubrimiento alguno, es decir, comúnmente 7 alambres. Este es el más usado en la construcción de capa simple (Emcocables, s/f).

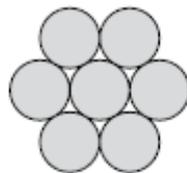


Ilustración 51. Torones de capa simple.

Recuperado de: Emcocables, sf.

**b) Seale**

Cuenta en su última capa con alambres de mayor diámetro que la interior, por lo que tiene mayor resistencia a la abrasión, se conforma por 19 alambres (Emcocables, s/f).



Ilustración 52. Torones Seale.  
Recuperado de: Emcocables, sf.

**c) Filler**

Estos torones se componen de dos capas de alambres e hilos de menor diámetro que rellenan vacíos entre ellas. Son empleados cuando es necesario emplear cables de mayor sección metálica. Comúnmente se componen de 25 alambres (Emcocables, s/f).

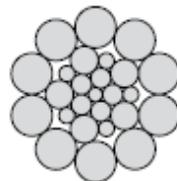


Ilustración 53. Torones Filler.  
Recuperado de: Emcocables, sf.

**d) Warrington**

Cuenta con una capa exterior formada por alambres de dos diámetros distintos, cuya posición están alternada en el interior de la corona. Este tipo de torón se conforma de 19 alambres (Emcocables, s/f).

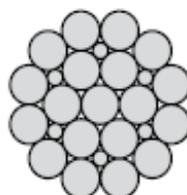


Ilustración 54. Torones Warrington.  
Recuperado de: Emcocables, sf.

### e) Warrington Seale

Es una combinación de alambres finos interiores que aportan flexibilidad y otra capa de alambres de mayor diámetro que aportan a la abrasión. Se conforman usualmente por 36 alambres (Emcocables, s/f).

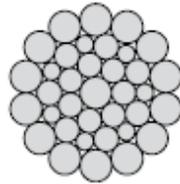


Ilustración 55. Torones Warrington Seale de 36 alambres.

Recuperado de: Emcocables, sf.

Cuando el cable es de 6x26, es decir 6 torones con un comportamiento en uso de 26 alambres, se combina la resistencia a flexión y a la abrasión.

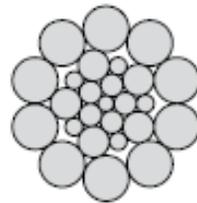


Ilustración 56. Torones Warrington Seale de 26 alambres.

Recuperado de: Emcocables, sf.

En la actualidad, con la finalidad de facilitar el recambio, dar protección contra la corrosión y evitar problemas en la estructura por actos de vandalismo que implique el corte de tirantes, existen un sinnúmero de protecciones como el mortero de cemento y el uso de cordones de pretensado (DYWIDAG - Systems International, 2015).



Ilustración 57. Configuración de tirantes pretensados.

Modificado de: DYWIDAG - Systems International, 2015.

#### **4.2.3.4. Alma**

Es el eje central de los cables alrededor del cual se encuentran los torones. Su función consiste en ser la base del cable, conservando la redondez, soportante presión por los torones y respetando las distancias o espacios entre sí. Esta alma puede ser de acero, fibra natural o sintética.

Existen dos fibras naturales: Sisal y Manila. La principal diferencia entre ellas es que las últimas son más largas y duras; por lo que, frente a otras más blandas como el Yute, Cáñamo o Algodón, representan un beneficio al comenzar su descomposición en un mayor tiempo. Es recomendable que las más blandas se utilicen solo como fibras de relleno.

Las fibras sintéticas, por lo general son de propileno con características físicas muy parecidas al comportamiento de las naturales más duras, pero además cuentan con una resistencia considerablemente mayor respecto a la descomposición producto de la salinidad. Su mayor desventaja es la pérdida de consistencia cuando se somete a varios ciclos de operación en poleas con mucha tensión por ser un material altamente abrasivo. Este tipo de material no se utiliza en estructuras como puentes y mucho menos cuando se somete a ambientes con altas temperaturas.

#### **4.2.3.5. Cables**

Se conforma por el conjunto de torones que están trenzados helicoidalmente alrededor del alma o núcleo. Su paso se determina en función de la forma en que los torones y alambres están enrollados. La longitud de paso es la distancia lineal hasta el punto del torón luego de dar una vuelta alrededor del alma.

Según el sentido de enrollamiento sobre el núcleo, puede ser derecho o izquierdo. Asimismo, el enrollamiento de los alambres en los torones y a su vez, sobre el núcleo, clasifica a los cables en paso regular o Lang.

##### **a) Paso regular**

En el cable, los alambres se encuentran en los torones con dirección opuesta, de esta manera el cable se hace más compacto, está balanceado y se vuelve estable.

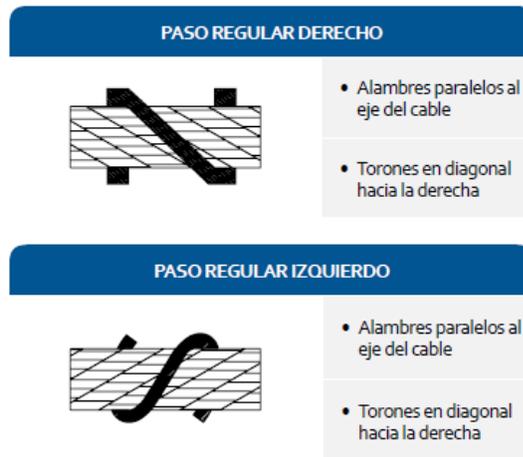


Ilustración 58. Características de los Pasos Regulares derecho e izquierdo.

Recuperado de: Emcocables, s/f.

### b) Paso Lang

Los alambres en los torones tienen una posición con la misma dirección de los torones del cable. Este tipo de cables tienen una excelente resistencia a la fatiga y desgaste por abrasión.

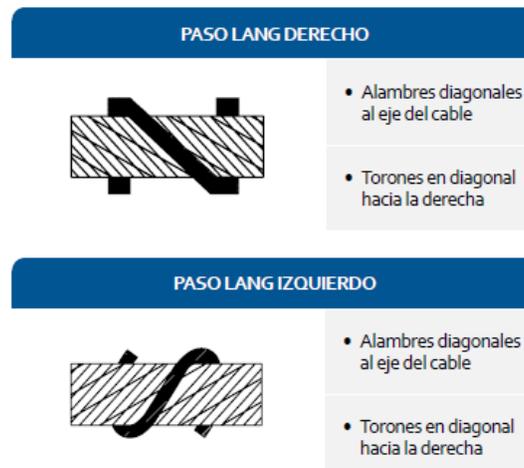


Ilustración 59. Características de los Pasos Lang derecho e izquierdo.

Recuperado de: Emcocables, s/f.

### 4.3. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

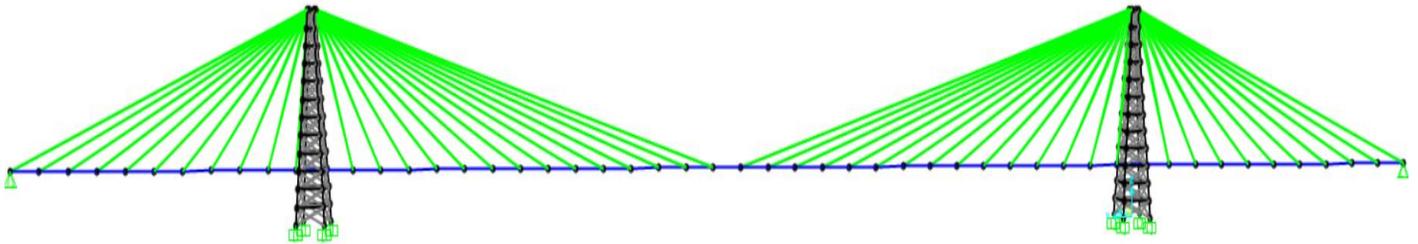


Ilustración 60. Vista frontal del acueducto atirantado.

Fuente: propia.

Como se observa en la Ilustración 60 y demás cortes longitudinales, el modelo está conformado por dos torres distanciadas entre sí a 180 metros, que corresponde al vano central. El análisis de los estudios de suelos y cálculos previos indican que se requieren vanos laterales a 63 metros de las torres. De esta manera, se alcanza la luz principal de 306 metros.

#### 4.3.1. TABLERO

Se ha adoptado como tablero a una tubería estructural que cuenta con las conexiones necesarias para estar suspendida de los obenques. Con ello se pretende que el tubo de PVC proyectado esté embebido en la sección adoptada, la cual tiene un mayor diámetro que la requerida para el sistema de agua potable.

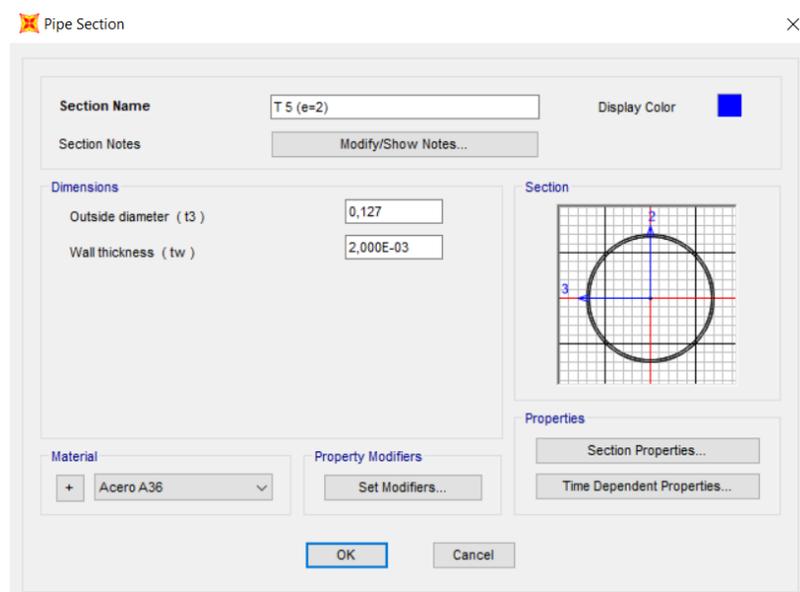


Ilustración 61. Definición de la tubería para embeber.

Fuente: propia.

El tablero se ha modelado como un elemento “frame”, es decir elementos barra que se comportan como una viga. En la modelación, este elemento se suspende de los obenques cada 6 metros, considerando su longitud comercial.

#### 4.3.2. TORRE

La geometría de la torre en este caso es la que se observa en la Ilustración 60.

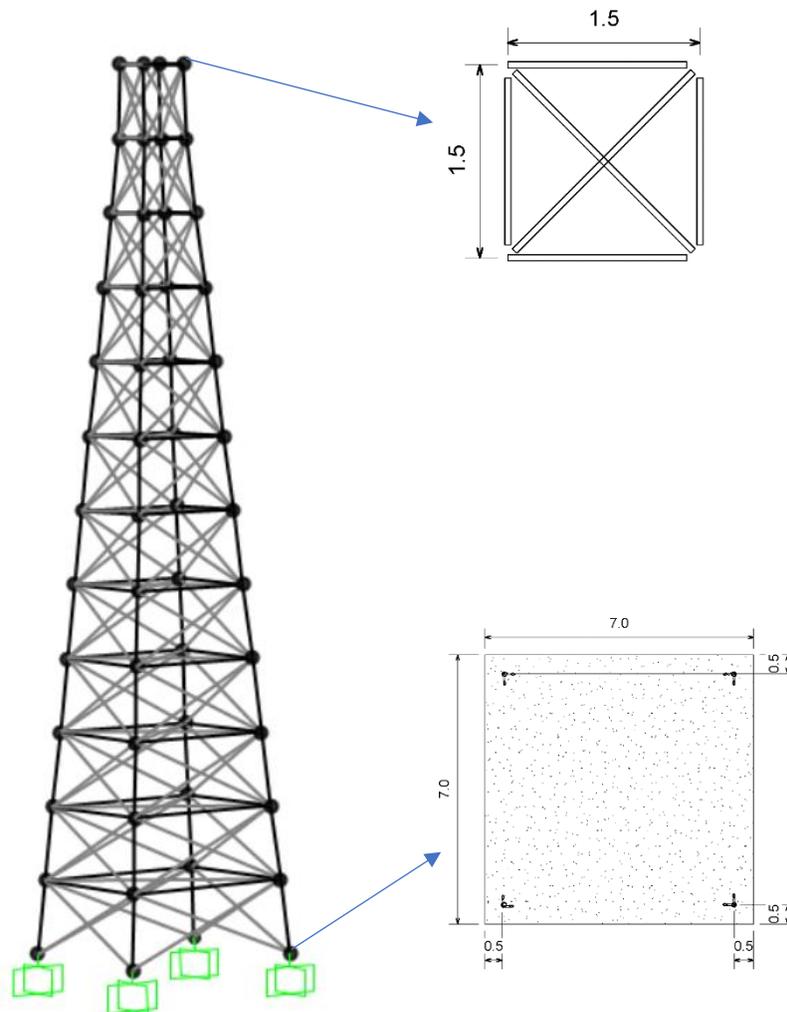


Ilustración 62. Geometría de las torres

Fuente: propia.

Su forma se asemeja a la de una pirámide truncada con base cuadrangular de 6 metros por 6 metros que va disminuyendo a medida que incrementa su altura hasta llegar a los 30 metros cuando su sección es de 1.5 metros por 1.5 metros. El gálibo considerado para el diseño es 7.5 metros con respecto al deslizamiento activo (obstáculo).

Esta estructura está conformada en su totalidad por elementos tubulares de acero A36, cuyas dimensiones se indican en las a continuación:

## Correas

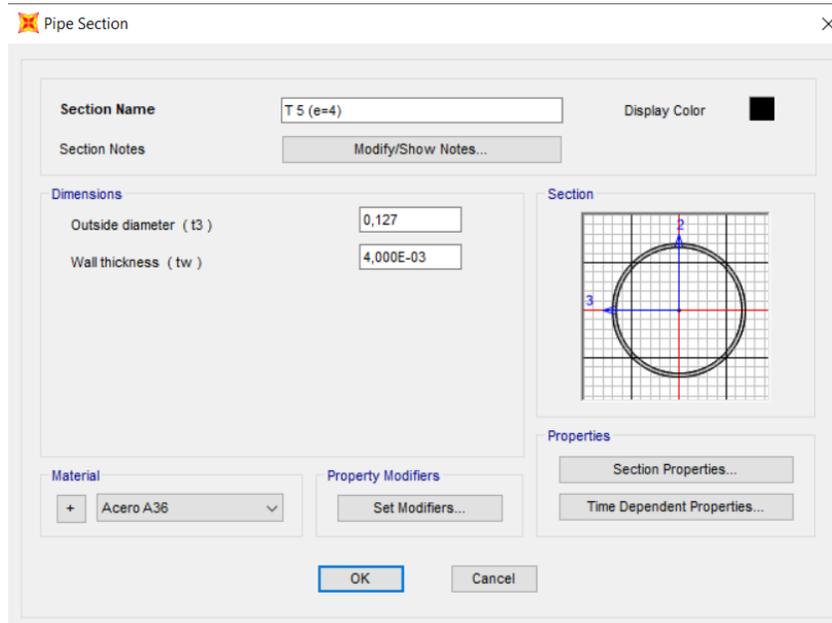


Ilustración 63. Sección tubular para correas.

Fuente: propia.

## Diagonales

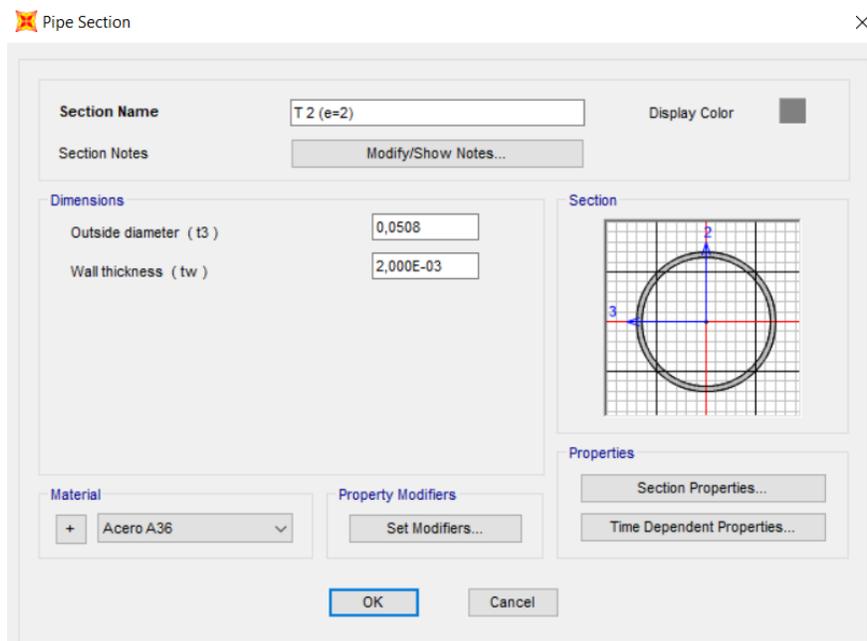


Ilustración 64. Sección tubular para diagonales.

Fuente: propia.

### 4.3.3. OBENQUES

El tablero está suspendido cada 6 metros por un par de obenques, de manera que la estructura cuenta con 100 obenques. La dimensión adoptada para el mismo considera los diámetros comerciales y comportamiento estructural del mismo.

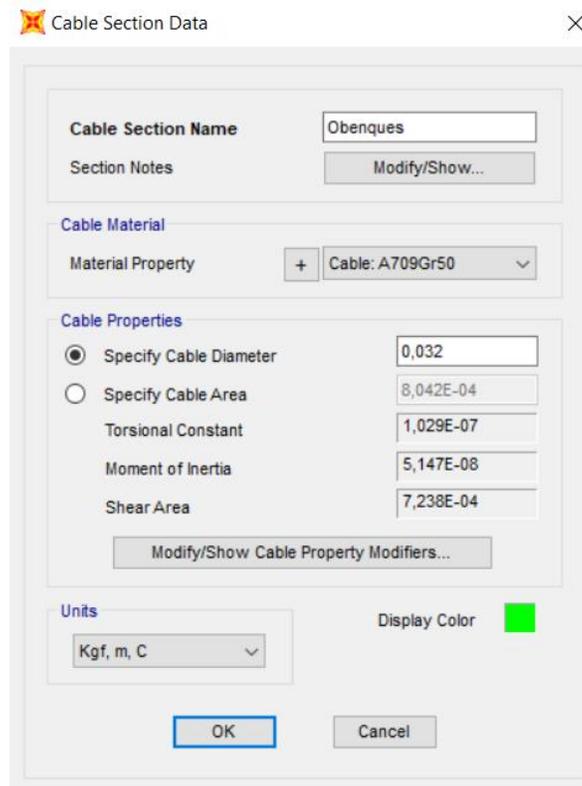


Ilustración 65. Obenques.

Fuente: propia.

Como se aprecia en la Ilustración 58, la configuración de tirantes adoptada en este diseño es de abanico para darle un mayor ángulo, con lo que la tensión disminuye y, por ende, también su diámetro. Este sistema también permite reducir la normal en el tablero, de manera que el diámetro adoptado es menor al que se requeriría con otras configuraciones de obenques.

## CAPÍTULO V: Diseño estructural del acueducto

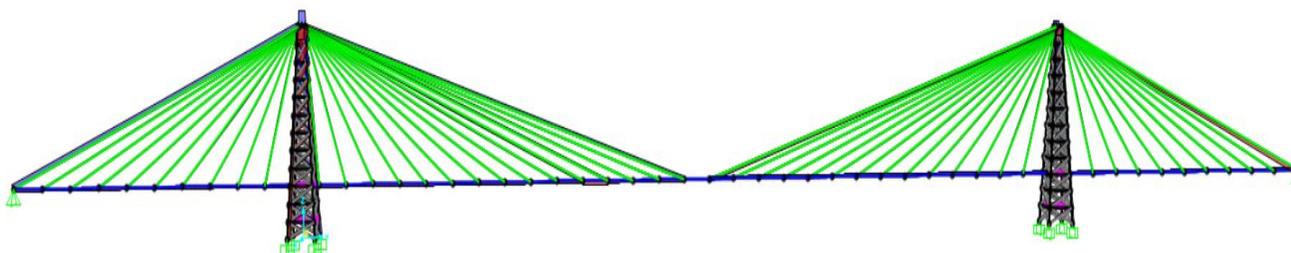


Ilustración 66. Cargas a tensión y compresión de la estructura.

Fuente: propia.

Se presenta el cálculo de los elementos más cargados a tracción y compresión en la armadura que conforma la torre. De este modo, se comprueba manualmente que son adecuados el modelo y las consideraciones adoptadas en SAP2000.

### 5.1. TABLERO

En el siguiente análisis, se procede a realizar el chequeo de la sección tubular adoptada como tablero. En primera instancia se consideran las propiedades mecánicas de los materiales que se utilizan en el tablero, en este caso, acero A36.

Materiales		
<b>Fy</b>	2540	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Es</b>	2100000	kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 11. Características de los materiales

Fuente: propia.

Posteriormente, se adoptan como datos las características geométricas de la sección tubular que fue adoptada como tablero, es decir el tubo estructural de 5 pulgadas que se especificó en el apartado anterior.

Datos de la sección		
<b>L</b>	6,00	m
<b>Diámetro</b>	12,70	cm
<b>Espesor</b>	0,20	cm
<b>Área</b>	126,68	cm <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	99,44	kg/m

<b>I<sub>x</sub></b>	153,44	cm <sup>4</sup>
<b>I<sub>y</sub></b>	153,44	cm <sup>4</sup>
<b>Z<sub>x</sub></b>	31,25	cm <sup>3</sup>
<b>Z<sub>y</sub></b>	31,25	cm <sup>3</sup>
<b>r<sub>x</sub></b>	4,42	cm
<b>r<sub>y</sub></b>	4,42	cm

Tabla 12. Datos de la sección.

Fuente: propia.

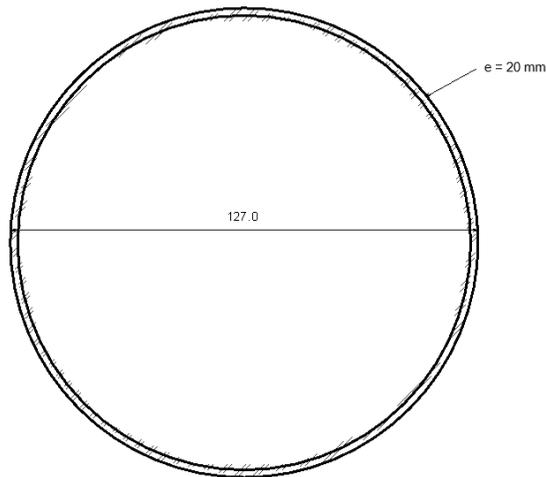


Ilustración 67. Corte de la sección transversal del tablero.

Fuente: propia.

Finalmente, se realiza la verificación de la sección a flexión y corte, para ello, se consideran los resultados obtenidos de la modelación, los cuales se presentan en las ilustraciones 68 y 69.

Con ello se comprueba que la sección adoptada como tablero es adecuada para las cargas que se consideran en el diseño.

Diseño a flexión			
<b>L<sub>b</sub> adoptada</b>	300,00	cm	
<b>M<sub>r</sub></b>	0,71	T-m	OK
<b>F<sub>cr</sub></b>	11110,23	kg/cm <sup>2</sup>	
<b>M<sub>n</sub></b>	17,05	T-m	
<b>øM<sub>n</sub></b>	15,34	T-m	OK
<b>L<sub>p</sub></b>	223,68	cm	
<b>L<sub>r</sub></b>	20682,89	cm	
<b>M<sub>p</sub></b>	79381,86	kg-cm	
	0,79	T-m	
<b>D/C</b>	84%		
Diseño a corte			
<b>øV<sub>n</sub></b>	193,06	T	
<b>V<sub>u</sub></b>	0,33	T	
<b>OK</b>			

Tabla 13. Diseño a flexión y corte del tablero.

Fuente: propia.

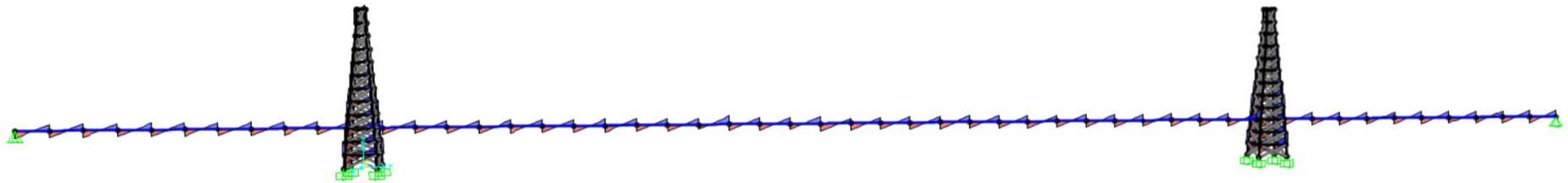


Ilustración 68. Diagrama de corte del tablero.  
Fuente: propia.

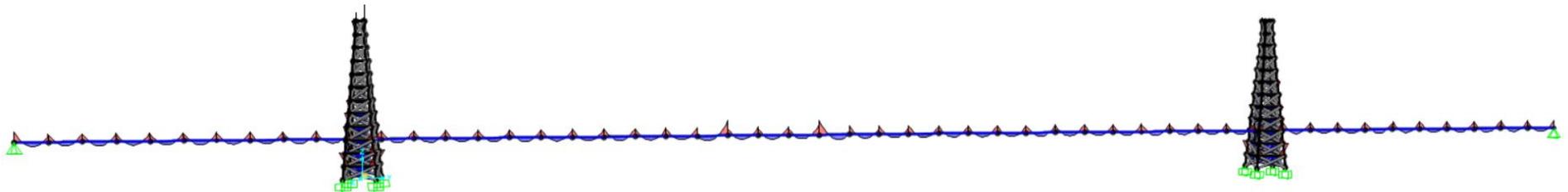


Ilustración 69. Diagrama de momento del tablero.  
Fuente: propia.

## 5.2. TORRES

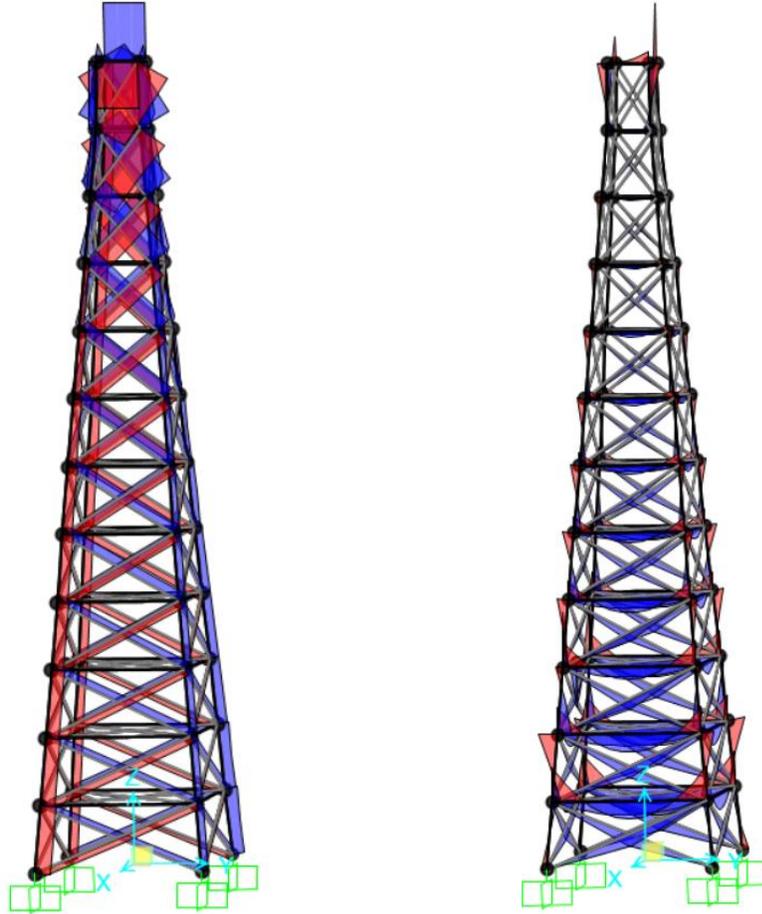


Ilustración 70. Diagramas de corte y momento en las torres.

Fuente: propia.

### 5.2.1. CRITERIO DE ESBELTEZ

Como se indicaba anteriormente, las secciones adoptadas son acero A36, por lo que el límite de fluencia será  $2540 \text{ kg/cm}^2$ . Para la verificación de las secciones a tracción en la tabla 14, se consideran los resultados de SAP2000, los cuales se presentan en la ilustración 70.

Carga [kg]		Área requerida [ $\text{cm}^2$ ]		Área adoptada [ $\text{cm}^2$ ]	Chequeo
<b>Diagonal central</b>	196,14	<b>A<sub>1</sub></b>	0,13	3,07	OK
<b>Diagonal lateral</b>	257,76	<b>A<sub>2</sub></b>	0,17	3,07	OK

Tabla 14. Comprobación de la sección en tracción.

Fuente: propia.

## 5.2.2. DISEÑO A COMPRESIÓN

Para el análisis se consideran el material y características geométricas de la tabla 15.

DATOS DE LA SECCIÓN			DATOS DEL ACERO A36		
<b>A=</b>	15,46	cm <sup>2</sup>	<b>G=</b>	789100	kg/cm <sup>2</sup>
<b>r<sub>x</sub>=</b>	4,35	cm	<b>E=</b>	2043000	kg/cm <sup>2</sup>
<b>r<sub>y</sub>=</b>	4,35	cm	<b>K=</b>	1	
<b>C<sub>w</sub>=</b>	7,77	cm <sup>6</sup>	<b>L=</b>	251,60	cm
<b>t<sub>w</sub>=</b>	0,40	cm	<b>F<sub>y</sub>=</b>	2540	kg/cm <sup>2</sup>
<b>r<sub>o</sub>=</b>	6,15	cm	<b>P<sub>a</sub>=</b>	13,51	T

Tabla 15. Datos del material y de la sección adoptada.

Fuente: propia.

La comprobación del diseño a compresión considera de los resultados de SAP2000 que se presentan en la Ilustración 70. En el análisis se toma el elemento más cargado y en él se verifica el pandeo general y local

PANDEO GENERAL				PANDEO LOCAL		
<b>En x:</b>	<b>K*L/r<sub>x</sub>=</b>	58		<b>D/t</b>	88,47	
<b>En y:</b>	<b>K*L/r<sub>y</sub>=</b>	58		<b>D/t límite</b>	30,56	
<b>En z:</b>	<b>F<sub>ez</sub>=</b>	62137,09	kg/cm <sup>2</sup>	<b>D/t calculado</b>	31,75	OK
	<b>K*L/r<sub>z</sub>=</b>	18				
<b>F<sub>n</sub>=</b>	1241,00	kg/cm <sup>2</sup>				
<b>P<sub>a</sub>=</b>	19181,69	kg				
	19,18	T	OK			

Tabla 16. Chequeo por pandeo general y local de la sección.

Fuente: propia.

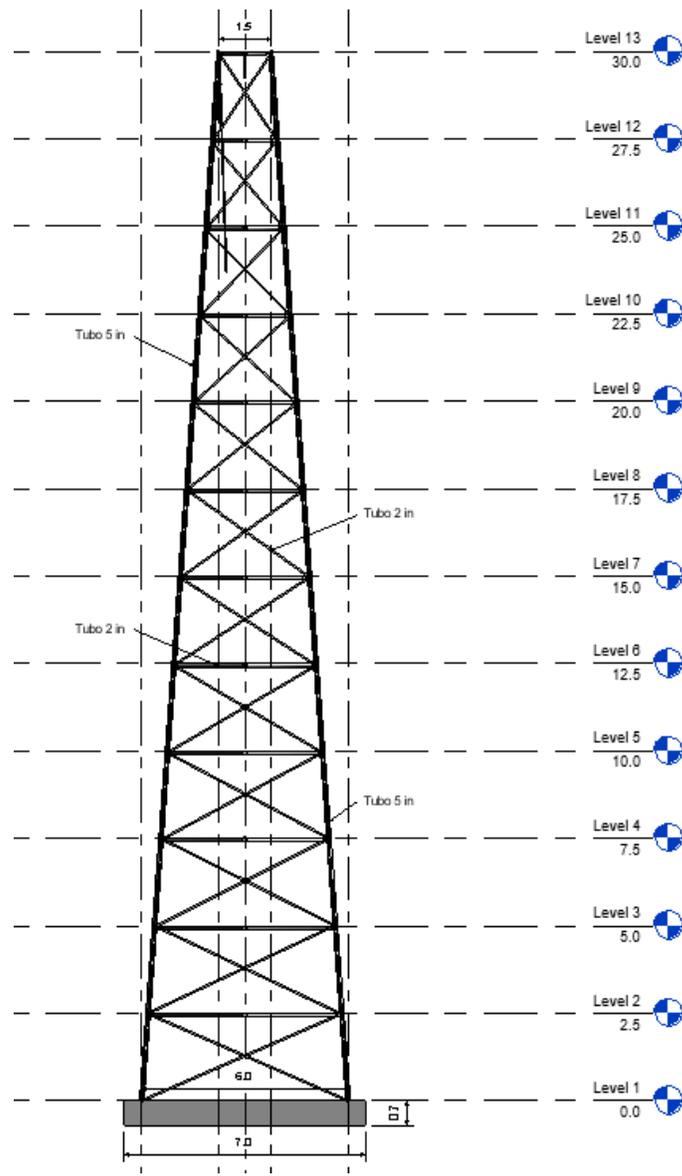


Ilustración 71. Corte transversal de la torre.

Fuente: propia.

### 5.3. OBENQUES

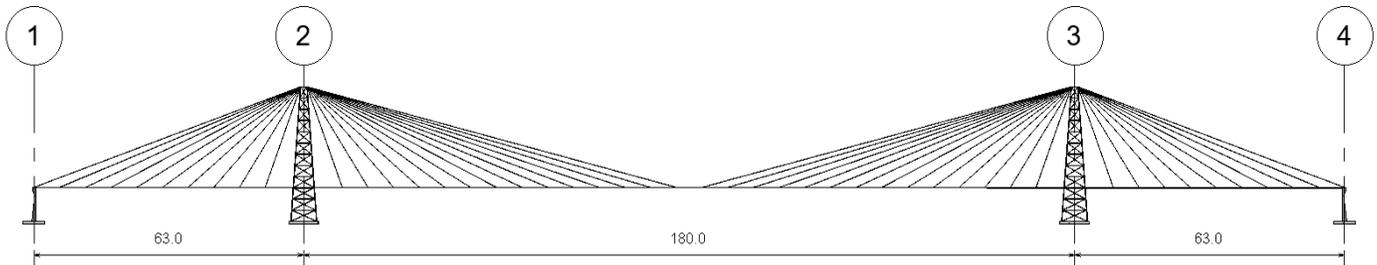


Ilustración 72. Configuración en abanico del sistema de obenques.

Fuente: propia.

Los obenques son elementos que trabajan únicamente a tracción, cuyo material es acero A709 Gr 50. A continuación, se presenta los resultados de la comprobación de su sección más cargada:

Carga [kg]		Área requerida [cm <sup>2</sup> ]		Área adoptada [cm <sup>2</sup> ]	Chequeo
<b>Obenques</b>	2840	<b>A<sub>1</sub></b>	1,35	8,04	OK

Tabla 17. Comprobación de la sección en tracción.

Fuente: propia.

Pese a que la sección adoptada cumple, se puede observar que el área adoptada no es lo suficientemente óptima, puesto que es considerablemente mayor que la que requiere la estructura. Sin embargo, como se indica en el marco teórico, los obenques, además de mantener el tablero suspendido a las torres, aportan rigidez a la estructura y permiten que su periodo fundamental sea el óptimo como para el paso elevado no entre en resonancia.

El incremento de la sección transversal de los obenques permite también que las cargas a las que pueda estar sometido el puente sean mayores, por lo que estos elementos se pueden mantener en caso de ampliación luego de la vida útil del puente, pues la capacidad máxima que alcanza con esta área es de 16.98 [T].

## **CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. CONCLUSIONES**

En conclusión, los pasos de acueducto con grandes luces pueden ser salvados con puentes atirantados donde todos sus elementos son de acero.

Los puentes atirantados son estructuras altamente flexibles y elásticas, por lo que además de ser capaces de soportar grandes cargas gravitacionales y de temperatura, presentan un mejor comportamiento frente a cargas dinámicas como el viento y sismo.

En consecuencia, los puentes atirantados son estructuras hiperestáticas que distribuyen con uniformidad las cargas, puesto que la presencia de un mayor número de obenques que actúan como apoyos intermedios, permite disminuir las solicitaciones de los elementos estructurales y sus deformaciones.

La suspensión central en puentes atirantados para acueductos proporciona la rigidez necesaria como para soportar cargas torsionales que se presentan en el diseño y las cuales pueden provocar resonancia.

Los obenques son elementos estructurales que, además de permitir suspender el tablero, proporcionan rigidez a la estructural sin aportar una carga muerta considerable. Por tanto, a medida que incrementa la esbeltez del tablero, mayor es la cantidad de tirantes o del diámetro de estos.

Las torres son estructuras que trabajan principalmente a compresión, por lo que los materiales y la geometría adoptada deben ajustarse a las solicitaciones correspondientes. En puentes ductos más livianos, es posible utilizar secciones de acero, sin embargo, para puentes sometidos a mayores cargas, es necesario que se opte por hormigón armado o pretensado.

El sistema de abanico evita la presencia de excesivas deformaciones en el tablero y la torre, por lo que, en estructuras de grandes luces con altas solicitaciones, es preferible optar por esta configuración.

La modelación en SAP2000 ajustada a los estados de carga analizados y a las propiedades mecánicas de los materiales utilizados, permite verificar que las dimensiones adoptadas para los elementos estructuras evaluados son adecuadas.

La elaboración de modelos matemáticos en un programa de análisis estructural tridimensional de elementos finitos permite conocer con mayor precisión los esfuerzos que se producen en una estructura, así como facilitar la elaboración de un modelo con condiciones más cercanas a las cuales estará sometida la estructura.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

Si bien el diseño de un puente atirantado ha demostrado ser viable en el diseño de este paso de acueducto, se recomienda analizar a futuro otras posibilidades de puentes para grandes luces como: puentes tipo arco o puentes colgantes.

En la definición de las limitaciones de este trabajo de titulación se especificó que no se realizaría el análisis de costos del proyecto, sin embargo, se recomienda que, en caso de contar con dos alternativas de diseño de este acueducto, se realice el análisis de costos mediante el cual se compruebe cuál alternativa es más económica.

El presente trabajo se centra en diseño de la superestructura del paso elevado requerido, por lo que se puede complementar con el desarrollo a futuro de la infraestructura necesaria en este puente atirantado.

Es fundamental que además del diseño estructural se realice un trabajo en donde se indique el método constructivo propicio para este caso de estudio, así como un manual de mantenimiento de la estructura.

### **6.3. TRABAJOS FUTUROS**

Como se indica en las recomendaciones, si bien este trabajo se centra en el diseño estructural de la superestructura del puente atirantado, existen una serie de trabajos para su desarrollo complementario y de análisis con los cuales se puede completar los resultados obtenidos hasta el momento.

Entre los estudios complementarios que se requieren son: el diseño de la infraestructura, es decir de los estribos y pilotes que se requieren en este proyecto, el desarrollo de un estudio respecto a la metodología de construcción del paso elevado y finalmente, el análisis de costos del proyecto.

De igual manera, es posible realizar comparativas bajo los mismos parámetros y solicitaciones, de otras alternativas de puentes de grandes luces o de puentes atirantados con configuraciones de torre y tirantes distintas a las adoptadas en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO . (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC: AASHTO.
- Animas, H., Pacheco, J., & Ortiz, J. (2014). Translation of SAP2000 Models to Equivalent-Models for Finite Element Command-Based Softwares. *Ideas en Ciencia*, 37-48.
- ASCE. (1988). *Guidelines for the Design of Cable-Stayed Bridges*. ASCE Library.
- Barahona, A. (2010). *Operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua*. San José: International Union for Conservation of Nature.
- Calderón, F. (2010). *Diseño del Puente Colgante Proyecto Geotérmico Las Pailas*. San José: ICOTEC.
- Cámara, A. (2011). *Seismic Behaviour of cable-stayed bridges: design, analysis and seismic devices*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Carrillo, W., González, N., & Velandia, D. (2006). Ansys-CivilFEM y SAP 2000 en la modelación estructural. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, 6-12.
- Carrión, F., Hernández, J., & Terán, J. (2005). *Estudio experimental de un puente atirantado: evaluación de cables*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Chapel Steel. (s/f). *ASTM 709*. Obtenido de Acero estructural de alta resistencia y baja aleación: <https://www.chapelsteel.com/es/a709-Grade50-Grade-345.html>
- Coral, M. (2013). *Ordenanza de delimitación urbana en las cabeceras parroquiales de la parroquia urbana y parroquias rurales del cantón Sucumbíos y sus centros poblados o núcleos*. La Bonita: Concejo del Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Sucumbíos.
- del Ojo, J. (1990). *Cultura, subsistencia y desarrollo en el cantón Sucumbíos*. Quito: Abya Yala.
- Dirección de planificación y ordenamiento territorial . (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Nueva Loja: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Sucumbíos.
- DYWIDAG - Systems International. (2015). *Multistrand Stay Cable Systems*. Ottawa: DWYDAG.

- Emcocables. (s/f). *Cables*. Cundinamarca: Emcocables.
- Empresas Públicas de Medellín. (2009). *Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM*. Medellín: EPM.
- Ezquerro, A. (2016). *Vigas Gerber: comportamiento estructural y estudio de la tipología arquitectónica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Fernández, C. (1962). *Puente sobre el Lago Maracaibo*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Frías, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gabaldón, F. (2007). *Método de los elementos finitos*. Madrid: GMC.
- GAD Provincial de Sucumbíos. (2016). *Cantón Sucumbíos*. Obtenido de [http://www.sucumbios.gob.ec/?page\\_id=8709](http://www.sucumbios.gob.ec/?page_id=8709)
- García, C. (29 de noviembre de 2017). *El puente sobre el Lago Maracaibo, orgullo marabino*. Obtenido de <https://cesarsimongarciaurbanotaylor.com/cesar-urbano-taylor-recomienda-enterate-el-puente-sobre-el-lago-de-maracaibo-orgullo-marabino/>
- García, E. (2017). *Análisis formal, modelado y recreación virtual del Puente y Viaducto del Alamillo*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Gimsing, N. (1983). *Cable-supported bridges*. Chister: John Wiley.
- Grattersat, G. (s/f). *Concepción de puentes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Hernández Ibáñez, S. (2002). *Puentes. Diseño, análisis y construcción*. La Coruña: Universidad de Coruña.
- Hernández, E. (s/f). *Manual en Español de SAP2000 V14.2*. México, D.F.
- Hosam-Eddin, A., & Abdel-Gaffar, A. (1995). *Seismic Passive Control of Cable-Stayed Bridges*. Los Angeles: Structural Research and Analysis Corporation.
- Huang, Y., Wang, Y., Fu, J., Liu, A., & Gao, W. (2018). *Measurement of the real - time deflection of cable-stayed bridge based on cable tension variations*. Measurement.
- INAMHI. (2012). *Anuario meteorológico*. Quito: INAMHI.

- INEC. (2010). *Base de Datos - Censo de Población y Vivienda*. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/base-de-datos-censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jiménez, D. (2007). *Diseño estructural de paso elevado de variante de la línea de conducción del Plan Maestro de agua potable de la ciudad de Loja en la quebrada Chirimoyo*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Kassimali, A. (2015). *Análisis estructural*. México, DF: Cengage Learning.
- López, R. (2000). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Manzano, M., & Pérez, R. (2012). *Análisis y diseño de un puente atirantado, ubicado en la provincia de Esmeraldas sobre el río Atacames*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- McCormac, J. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero (Método LRFD)*. México, D.F.: Editorial Alfa Omega.
- Mendoza, T., Parodi, R., Toro, S., & Rivera, L. (s/f). *Características del acero A36-A572-A709*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Ministère de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et des Sports. (2010). *Différents types de ponts*. París: Académie de Bordeaux .
- Morgenthal, G. (1999). *Cable Stayed Bridges Earthquake Response and Passive Control*. London: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Naaman, A. (2004). *Prestressed Concrete - Analysis and Design Fundamentals*. Michigan: Techno Press 3000.
- Ndoye, C. (2004). *Analyse structurale et prédimensionnement d'un Pont Haubané*. Senegal: Ecole Supérieure Polytechnique.
- NEC-SE-CG. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito.
- NEC-SE-DS. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito.
- Orellana, J. (s/f). *Conducción de aguas*. Buenos Aires: UTN.
- Poldolny Walter, J. (1976). *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges*. Washigton, D.C.: Interscience.

- Rodríguez, W., Muñoz, E., & Núñez, F. (2007). Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes. *Ingeniería*, 43-59.
- Romo, M. (2009). *Puentes y viaductos*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Ros, M. (2019). *Análisis mediante elementos finitos de estructuras de acero con uniones semirrígidas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Ruiz, L. e. (s/f). *Flujo en canales abiertos*. Obtenido de Hidráulica: <https://hidraulica65.webnode.com.co/paseos/>
- Saifi, Y., & Hürol, Y. (2018). *Peace at Last Sight: The Other Face of Warchitecture*. Jerusalén: Al Quds University.
- Sanchez de León, R., Bernal, C., & Sanchez de León, F. (2012). *Talavera de la Reina cable-stayed bridge*. Toledo: Estudio AIA.
- Santos, R. (2011). *Introduccion al estudio de las características y el comportamiento estructural de los puentes atirantados*. Caracas: Ministerio para el Poder Popular de la Defensa.
- Sarzuri, A. (2006). *Texto guía para SAP2000* . Cochabamba.
- SENPLADES. (2014). *Agua potable y alcantarillado para erradicar la pobreza en el Ecuador*. Quito: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.
- Servant, C. (s/f). *Les ouvrages construits sur cintre*. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Souza, J. (1984). *Contribuição ao estudo de pontes estaiadas*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Torneri, P. (2002). *Comportamento estrutural de pontes estaiadas comparação de alternativas*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Turkkan, N. (2006). *Conception des ponts*. Moncton: Université de Moncton.
- Vargas, J. (2010). *Cálculo de estructuras utilizando elementos finitos con cómputo en paralelo*. Guanajuato: CIMAT.
- Velasco, B. (2016). *Sucumbióis dio un giro a su economía para salir de la crisis*. Quito: El Comercio.

Walther, R. (1985). *Ponts haubanés*. Lausanne: Presses Polytechniques Romandes.

Walther, R., Houriet, B., Isler, W., & Moïa. (1988). *Cable Stayed Bridges*. Londres.

Yazdani-Paraei, H., Moharrami, H., Maalek, S., & Heydari, M. (2015). Optimum design of cable-stayed bridges. *Australian Journal of Structural Engineering*, 99.