



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS TENSADAS
CON BASE EN MODELOS A ESCALA.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar el título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

ACOSTA DE ABREU, Alejandra Daniela

GONZALEZ IARUSSI, Alessandra

PROFESOR GUÍA

MSc. Ing. GUILLERMO BONILLA

FECHA

Caracas, junio 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS TENSADAS
CON BASE EN MODELOS A ESCALA.**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: **VEINTE (20)** puntos, mención publicación.

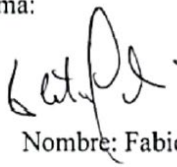
JURADO EXAMINADOR

Firma:



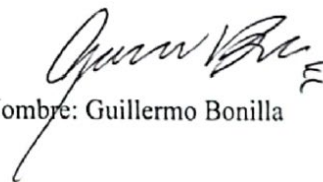
Nombre: José Manuel Velasquez

Firma:



Nombre: Fabio Plata

Firma:



Nombre: Guillermo Bonilla

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar el título de

INGENIERO CIVIL

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia; a mi mama, Elia; mi abuela, María José; mi tía, Hilda y mi papa, Humberto por acompañarme en todo el proceso y nunca permitir que me rindiera, por siempre tener una palabra de ánimo y ayudarme en los momentos más difíciles.

A Dios y el Universo por siempre guiarme en los momentos difíciles y permitirme conocer a personas tan importantes para mí.

A mis amigos de la carrera, hicieron que la carga resultara menos pesada y que cada día aprender resultara más divertido. Iván, Andre, Vane, Ori, Luisi, Melanie, Mafer y muchos otros, gracias por siempre estar, hasta en el momento más difícil. También a esas personas especiales que conocí casi al último gracias por hacer el final de la carga académica algo inolvidable.

A mis amigos del laboratorio, con los cuales reí, llore, disfrute, aprendí, Meme, Steph, Edgar, Juan, Ricardo, Eduardo, Samuel y Santi, gracias por todo, las ayudas, consejos y el compañerismo que me brindaron, sin ustedes nada habría sido igual.

A Claudia, Ana y David por estar en todo el proceso, escuchar cada complicación y éxito logrado y siempre tener una palabra de aliento o un consejo.

A mi compañera Alessandra, por enfrentar este gran reto junto a mí y por los años de amistad y estudio compartidos.

A nuestro tutor, Guillermo Bonilla por darnos la oportunidad de aprender por medio de nuestro tema de tesis y del laboratorio y enseñarnos que todo se puede lograr con un poco de creatividad y buena disposición.

A todos los técnicos de los laboratorios de la universidad, que día a día estuvieron dispuestos a dar una mano amiga.

A la UCAB por permitirme aprender a ser un ingeniero civil y darme la oportunidad conocer a quienes espero sean mis amigos muchos años más.

Mis sinceros agradecimientos.

- Alejandra Acosta De Abreu

En primer lugar, quiero agradecerle a Dios, la Virgen y a los ángeles por siempre protegerme y guiarme hacia el camino correcto, gracias por siempre darme las fuerzas para continuar y jamás abandonarme.

A mi familia, principalmente a los pilares de mi vida, mis padres Antonella Iarussi y Carlos Gonzalez por siempre y en todo momento brindarme su apoyo y amor incondicional, por motivarme cada día a ser la mejor versión de mí, por ser mi motor e impulsarme a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades, sin ustedes este logro no sería posible.

A mi novio, Mario Di Pietro, por escucharme, aconsejarme y apoyarme con su gran cariño incondicionalmente.

A mi tía, Sulma Gonzalez, por ser mi segunda madre durante esta etapa tan importante de mi vida, por apoyarme siempre y en todo momento.

A mis amigas, por siempre estar para mí en las buenas y en las malas, por apoyarme y comprenderme siempre.

A mis amigos de la universidad, por las horas compartidas, las risas, las historias vividas y el apoyo para salir adelante juntos.

A mi compañera de tesis Alejandra, por ser un apoyo durante gran parte de la carrera, por las experiencias vividas y sobretodo por su amistad.

A nuestro tutor, Guillermo Bonilla por sus enseñanzas y consejos durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, sin su guía no hubiese sido posible.

A los técnicos que laboran en el Laboratorio de Materiales de Construcción y Tecnología del Concreto y en los laboratorios de la facultad por su disposición, ayuda y consejos.

Por último, agradezco a la Universidad Católica Andrés Bello, por ser mi segunda casa durante estos 5 años de carrera, a mis profesores por los conocimientos adquiridos y formarme como Ingeniero Civil.

Infinitas Gracias.

Alessandra Gonzalez Iarussi.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
I.1. Planteamiento del problema	2
I.2. Antecedentes.....	2
I.3. Objetivos de la investigación.....	4
I.3.1. Objetivo General.....	4
I.3.2. Objetivos Específicos.....	4
I.4. Alcance y Limitaciones	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO.....	5
II.1. Sistemas tensados	5
II.1.1. Membranas flexibles tensionadas.....	5
II.1.2. Tensegridad	5
II.1.2.1. Tipos	6
II.1.2.1.1. Tensegridad pura	6
II.1.2.1.2. Tensegridad falsa.....	7
II.1.3. Sistemas Atirantados	7
II.1.3.1. Tipos de puentes atirantados.....	8
II.1.3.2. Elementos que conforman los sistemas atirantados	9
CAPÍTULO III.....	10
MARCO METODOLÓGICO	10
III.1. Naturaleza de la investigación	10
III.2. Población y muestra.....	10
III.3. Recolección de datos.....	10
III.4. Equipos	10
III.5. Accesorios empleados.....	10

	v
III.6. Herramientas empleadas	10
III.7. Variables estudiadas.....	11
III.8. Fases de ejecución.....	11
III.9. Estructuras construidas	12
III.9.1. Estructura tenségrica	12
III.9.1.1. Generalidades	12
III.9.1.2. Dimensiones	12
III.9.1.3. Mezcla	13
III.9.1.4. Refuerzo	13
III.9.1.5. Tirantes.....	14
III.9.1.6. Proceso	14
III.9.2. Sistema atirantado - Puente	15
III.9.2.1. Dimensiones	15
III.9.2.2. Escala	16
III.9.2.3. Modelo a escala.....	16
III.9.2.4. Solución de estabilidad.....	19
III.9.2.5. Proceso	20
III.10. Modelados.....	21
III.10.1. Estructura tenségrica	21
III.10.1.1. Desplazamiento y aceleración.....	21
III.10.1.2. Tensiones.....	21
III.10.2. Sistema atirantado - Puente	22
III.10.2.1. Tensiones.....	22
CAPÍTULO IV	24
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	24
IV.1. Estructura tenségrica.....	24
IV.1.1. Evaluación del desplazamiento	24
IV.1.2. Aceleración	25
IV.1.3. Tensiones	25

	vi
IV.1.3.1. Variación de tensiones	26
IV.1.4. Condición de estabilidad.....	28
IV.2. Sistema Atirantado – Puente.....	28
IV.2.1. Tensiones	28
IV.2.2. Sobrecarga.....	30
IV.2.3. Condición de estabilidad.....	31
CAPÍTULO V	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33
V.1. Conclusiones	33
V.2. Recomendaciones.....	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosificación de mortero para vaciar una pieza de la estructura tensébrica.	13
Tabla 2. Masa de las piezas que conforman la estructura tensébrica.	13
Tabla 3. Altura del mástil.	16
Tabla 4. Tensiones obtenidas del ensayo de la estructura tensébrica en kgf/cm ²	25
Tabla 5. Tensión y carga de los tirantes estabilizadores en la condición de equilibrio del sistema.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo simplex de estructura tenségrica.....	7
Figura 2. Modelado en SketchUp y modelo final de estructura tenségrica.....	12
Figura 3. Dimensiones en cm de la estructura tenségrica y nomenclatura de los tirantes.	12
Figura 4. Armado de aceros de refuerzo de las piezas que conforman la estructura tenségrica. ...	13
Figura 5. Proceso de vaciado de las piezas que conforman a la estructura tenségrica.....	14
Figura 6. Hipótesis de diseño.	15
Figura 7. Corte transversal de la sección de la viga cajón del puente.....	15
Figura 8. Etapas constructivas del puente.	18
Figura 9. Tirantes estabilizadores.....	19
Figura 10. Montaje del sistema de modelado de la estructura tenségrica.	21
Figura 11. Calibración de las ligas.....	22
Figura 12. Ubicación de la sobrecarga a lo largo del puente.	23
Figura 13. Tensiones de la estructura tenségrica.....	26
Figura 14. Angulo de los cables tensores de la estructura tenségrica en el máximo desplazamiento.....	27
Figura 15. Tensiones de los cables en el estado de equilibrio.....	29
Figura 16. Ubicación de la carga contra tensión de los tirantes estabilizadores.	30

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Longitud de tirantes (ligas) contra tensión (kgf/cm^2) y carga (kgf).	23
Gráfica 2. Desplazamiento de la pieza tenségrica en el eje Y contra el tiempo.....	24
Gráfica 3. Aceleración de la pieza tenségrica en el eje Y contra el tiempo.	25
Gráfica 4. Variación de las tensiones durante el desplazamiento, en función del ángulo.	27

RESUMEN

El presente trabajo de investigación plantea el análisis del comportamiento de estructuras tensadas con base en modelos a escala.

En la exploración de sistemas estructurales alternativos a los tradicionalmente usados, se introducen los sistemas atirantados como sistema viable para estructuras ligeras en el medio de la ingeniería civil. Con la finalidad de comprender el comportamiento de dichas estructuras, se realizó una investigación enfocada, en primer lugar, al principio de la tensegridad, con el propósito de construir un modelo en mortero con una configuración geométrica adecuada. Posteriormente se planteó el diseño y construcción de un sistema atirantado, específicamente un puente asimétrico a escala, con intención de definir una solución de estabilidad conveniente, debido a que la hipótesis resultaba inestable.

La caracterización de la estabilidad de los sistemas se realizó una vez construidos los mismos, mediante el análisis de su comportamiento ante acciones externas. En primer término, respecto a la estructura tensébrica se estudió el comportamiento de los tensores ante un desplazamiento donde se evidenció la variación de los mismos, así como también el desplazamiento y la aceleración del sistema. Por otro lado, en el puente se ejecutó un estudio de tensiones, donde se percibió la variación de solicitaciones en los tensores estabilizadores del sistema, en diferentes casos de sobrecarga del puente según la ubicación de la misma.

Finalmente, se obtuvieron los resultados a través de curvas y parámetros, que permitieron el análisis del comportamiento de dichos modelos con base en el estado de sus tensiones. Para la estructura tensébrica, se evidenció un aumento en el estado de las mismas durante el movimiento oscilador amortiguado causado por una fuerza excitadora. Mientras que en el puente atirantado asimétrico se observó que, para el estado de equilibrio, los tensores estabilizadores presentan las mayores tensiones registradas.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

I.1. Planteamiento del problema

En los últimos años el nivel de desarrollo de infraestructuras ha evolucionado en conjunto a las necesidades del hombre y este se encuentra en un progreso constante, lo que asegura proyectos ambiciosos en el área. Uno de los sistemas estructurales que ha causado impacto ha sido el relacionado a las estructuras tensadas, compuestas por membranas flexibles, la tensegridad, y los sistemas atirantados.

Por tal motivo se ha planteado estudiar y realizar dos (2) modelos a escala con el fin de comprender y analizar el comportamiento y la estabilidad de las estructuras tanto tensegricas como atirantadas con el fin de construir, igualmente, una estructura tensegrica y un modelo a escala de un puente atirantado asimétrico.

I.2. Antecedentes

Para el desarrollo de la presente investigación, se tomaron como antecedentes trabajos de grado relacionados con la presente área de estudio, los mismos fueron realizados en diferentes universidades europeas y de Latinoamérica.

- GARCÍA ALBERTOS TERESA. (2019). *“Estudio y diseño de estructuras tensegríticas”*. TEG. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

El trabajo especial de grado tuvo como objetivo el estudio de la tensegridad y qué conlleva la construcción de este tipo de estructuras. La autora, para obtener una mayor comprensión del problema, funcionamiento y comportamiento de estas estructuras, realizó la escritura de un programa en lenguaje de programación, con la finalidad de obtener datos y observar la evolución de estas estructuras a lo largo del tiempo mientras están presentes un conjunto de fuerzas. Posteriormente se realizó el diseño de una figura tensegrítica a partir de las bases de conocimiento

adquiridas a lo largo del proceso de este trabajo. Hallada una estructura estable, se procedió a su construcción y verificación de validez de la misma.

- CHUMACERO GOYTENDÍA CARLO ANDRÉ. (2019). *“Prototipado y simulación de una maqueta de puente tipo warren hecha con palitos de madera”*. TEG. Universidad de Valladolid. Valladolid, España.

El presente trabajo de fin de grado basó su investigación en estudiar las propiedades mecánicas, las frecuencias propias y coeficientes de amortiguamiento en una estructura esbelta hecha de madera sometida a variaciones ambientales y de carga. Para ello, se llevó a cabo el prototipado de una estructura en celosía de tipología Warren realizada con paletas de madera (palitos de helado), en la fase experimental se realizaron ensayos estáticos y dinámicos para estudiar las propiedades mecánicas y el comportamiento de este material sometido a distintas cargas con variación de las condiciones ambientales.

- MANZANO SUÁREZ MARCO EFRÉN Y PÉREZ NOLIVOS RICARDO PAÚL. (2012). *“Análisis y diseño de un puente atirantado, ubicado en la provincia de Esmeraldas sobre el Río Atacames”*. TEG. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

El trabajo de investigación tuvo como objetivo comprender el funcionamiento estructural de los puentes atirantados, específicamente de un puente atirantado asimétrico con distribución de obenques en semi-arpa y con un tablero de hormigón armado; cuyo modelado se realizó utilizando el software SAP2000. Con la finalidad de lograr ejecutar el análisis de los datos obtenidos para posteriormente desarrollar el diseño estructural de dicho puente contemplado en planes estructurales.

I.3. Objetivos de la investigación

I.3.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de estructuras tensadas con base en modelos a escala.

I.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los sistemas tensados según su condición de estabilidad.
- Evaluar el comportamiento de una estructura tensegrítica con base en su estado de tensiones.
- Analizar el comportamiento de un puente atirantado asimétrico a escala.

I.4. Alcance y Limitaciones

Para el estudio desarrollado se realizaron modelos de estructuras tensadas con el objetivo de analizar el comportamiento de las mismas con base en modelos a escala desarrollados con mortero.

Adicionalmente resulta conveniente destacar que el modelo a escala del puente atirantado resulta de una hipótesis de diseño ficticia, y estuvo limitado al estudio del comportamiento de las tensiones que lo soportan, en función de cargas aplicadas al mismo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Sistemas tensados

Están conformados por estructuras que dependen de un adecuado estado de las fuerzas internas de tracción para su correcto desempeño (Oliveira, 2011). Sin embargo, las estructuras a tensión no se limitan a un solo tipo de estructura, estas están compuestas por membranas flexibles tensionadas, estructuras tenségricas y sistemas atirantados, como puentes colgantes o atirantados.

II.1.1. Membranas flexibles tensionadas

Son la categoría de estructuras que, mediante esfuerzos de tensión, ya sea tracción o compresión producen la rigidez necesaria para resistir las cargas impuestas sobre ellas. Estos esfuerzos son aplicados a la mayoría de sus componentes los cuales son generalmente cables, membranas o telas especiales.

El comportamiento de la membrana viene dado a lo largo de sus dos direcciones principales, con una relación directa luz-flecha, es decir, a mayor curvatura mayor absorción de cargas; por ende, en la membrana actúan dos tipos de fuerzas: la tracción y la compresión. Así, una regla fundamental para la estabilidad de las cubiertas es que una de las estructuras de las superficies esté formada por tensiones de dos curvas en direcciones opuestas, con el fin de lograr una mejor estabilidad estructural.

II.1.2. Tensegriedad

Es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos, generalmente barras, no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados, habitualmente cables, que cumplen la función de delimitar espacialmente el sistema. (Gómez, V. s.f.).

Una estructura tensébrica es un conjunto de fuerzas de tracción y compresión que a partir de determinados valores de tensión en sus elementos mantiene una forma determinada, siendo la estructura estable por sí misma. Una de las particularidades más destacadas de las estructuras tensébricas es que su comportamiento mecánico global no se ve influido por la disposición de los elementos ni por el material empleado, siempre y cuando los elementos de la estructura puedan soportar los esfuerzos solicitantes a nivel de sección.

Un paso clave en el diseño de estructuras tensébricas es la determinación de su configuración geométrica y tensional, conocida como el proceso de búsqueda de forma (en terminología inglesa “form-finding”). Para entender el comportamiento de equilibrio estable independiente de reacciones externas, es necesario realizar un análisis estático de las fuerzas de tensión y compresión que intervienen en cada nudo. Cada vértice en cuestión ha de estar en equilibrio para así dotar de estabilidad total a cada elemento y, así, a la estructura.

La tensegridad se puede clasificar como pura y falsa, como se describe a continuación, sin embargo, resulta relevante aclarar que, de acuerdo a Gómez, se clasifica como "estructura principal" a los elementos que asumen funciones principales en el proyecto.

II.1.2.1. Tipos

II.1.2.1.1. Tensegridad pura

- **Estructura general:** Se trata de un conjunto donde los esfuerzos de tracción y compresión son tan elevados que el peso de las barras y cables se vuelve despreciable, la estructura básica es conocida como “simplex” y consta de 6 vértices unidos por 3 barras sometidas a compresión y sujetadas por 9 cables traccionados.

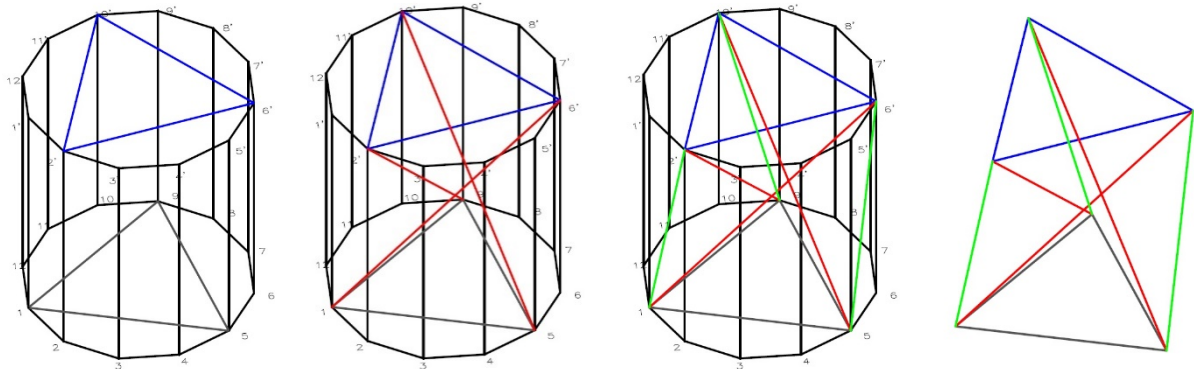


Figura 1. Modelo simplex de estructura tensegrica.

Fuente: lanzuka, autoCAD 2011

- **Estructura parcial:** Los pabellones son un ejemplo de esta clasificación, los sistemas de tensegridad juegan el rol de soporte de la estructura, lo que no es la función principal del proyecto. Desde el punto de vista de la apariencia, es fácil confundir que estos aplican el módulo “simplex” de tensegridad.

II.1.2.1.2. Tensegridad falsa

- **Estructura general:** La estructura no es completamente autoportante, se basa en anclajes que se fijan en tierra. Las componentes tensadas no han formado un envolvente que sumerge todos los componentes comprimidos, sino que el sistema está enmarcado por un zuncho rígido, que es el terreno.
- **Estructura parcial:** En general, en esta categoría, los proyectos no cuentan con la existencia de los sistemas de tensegridad, tanto parciales como globales. Los proyectos son aquellos que cuentan con una estructura tensada y tienen apariencias características similares a tensegridad, como es el caso de puentes atirantados.

II.1.3. Sistemas Atirantados

Los sistemas estructurales atirantados son aquellos que emplean cables, tirantes o elementos que se encuentran sometidos a tracción y que, en su mayoría, sostienen un tablero que se encuentra suspendido mediante la conexión entre los cables y uno o varios pilotes. Comúnmente se refiere

como sistemas atirantados a los puentes con el mismo nombre, que será uno de los objetivos de investigación.

Respecto a los puentes atirantados los elementos fundamentales de la estructura resistente de estos son los tirantes, los cuales proporcionan una serie de apoyos intermedios equivalentes a resortes más o menos rígidos. Sin embargo, la estructura resistente básica del puente atirantado no se encuentra formada únicamente por los mismos; son necesarias las torres o mástiles para elevar el anclaje fijo de los tirantes, de forma que introduzcan fuerzas verticales en el tablero para crear los pseudo-apoyos; del mismo modo el tablero interviene en el esquema resistente, puesto que los tirantes, al ser inclinados introducen fuerzas horizontales que se deben equilibrar a través de él. (Cardoza, M., Villalobos, J. 2005).

Su estabilidad radica en que los cables deben estar trabajando a tracción (en su máximo estado de tensión), deben ser rígidos y que todos los extremos requieren un cable que lo “sostenga” debido a que si este queda suspendido tiende a volcarse.

II.1.3.1. Tipos de puentes atirantados

- **Puentes atirantados de mástil lateral:** el mástil no está situado en el mismo plano de la pista (longitudinal), sino a un lado, este diseño permite puentes con pistas curvas.
- **Puente atirantado asimétrico:** poseen un mástil a un extremo, mismo al que llegan los cables. La fuerza de los cables puede ser compensada continuando estos hasta contrapesos en el suelo. Los cables pueden ser sustituidos por pilares de hormigón prensado que trabajan a compresión.
- **Puente atirantado de pilón contrapeso:** resulta similar al anterior, salvo que los cables no continúan hasta el contrapeso, sino que están anclados al mástil y el mástil y su anclaje en el terreno.

II.1.3.2. Elementos que conforman los sistemas atirantados

- **Viga:** “miembro estructural en el cual puede considerarse que las tensiones internas en cualquier sección transversal dan como resultantes una fuerza cortante y un momento flector.” (COVENIN 2004,1998).
- **Viga en cajón:** “viga cuya sección está compuesta por dos planchas que constituyen sus alas, unidas a otras dos planchas que forman sus almas, rigidizándose internamente por medio de planchas llamadas diafragmas donde se necesiten.” (COVENIN 2004,1998).
- **Losa maciza:** “estructura monolítica de dimensiones preponderantes en las direcciones longitudinal y transversal, armada en una sola dirección” (COVENIN 2004,1998).
- **Tablero:** base superior de rodaje que sirve además para repartir la carga a vigas y largueros, en casos especiales, el tablero puede estar estructurado para sostener una vía férrea, un canal de navegación, un canal de riego u otros.
- **Voladizo:** “elemento con un extremo libre que sobresale de las paredes o fachadas. También se le conoce como "volado" o "cantilever"” (COVENIN 2004,1998).
- **Mástil:** elemento vertical o inclinado, que soporta una serie de cables de carga. También llamado torre.
- **Tirante:** elemento constructivo, generalmente cables de acero, que funcionan a tracción y forman parte de una estructura con elementos diferentes.
- **Torón:** se forma por el enrollamiento helicoidal de un número determinado de alambres alrededor de un elemento central.
- **Anclajes:** “son elementos de tracción cuya función es aplicar la fuerza estabilizadora al terreno, mientras que la losa de concreto armado, tiene las múltiples funciones de repartir las fuerzas de los anclajes en toda la superficie del talud, contener los volúmenes más superficiales del terreno, y proteger los materiales contra fenómenos como la erosión y la meteorización.” (Rodríguez, N. 1988).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

III.1. Naturaleza de la investigación

Se trata de una investigación experimental de campo, exploratoria y descriptiva.

III.2. Población y muestra

La población estuvo conformada por dos (2) modelos, el primero, una estructura tenséfrica y el segundo un puente atirantado asimétrico a escala.

III.3. Recolección de datos

La recolección de datos se realizó una vez que ambas estructuras se encontraron endurecidas y atirantadas, siguiendo los procesos necesarios para este estado. El proceso de diseño, mezclado, vaciado, y posterior armado de las estructuras fue documentado con material multimedia.

III.4. Equipos

- Prensa Universal Ibertest (capacidad de 150 toneladas) del Laboratorio de Tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello.
- Unidad de manejo de datos DEWEsoft.

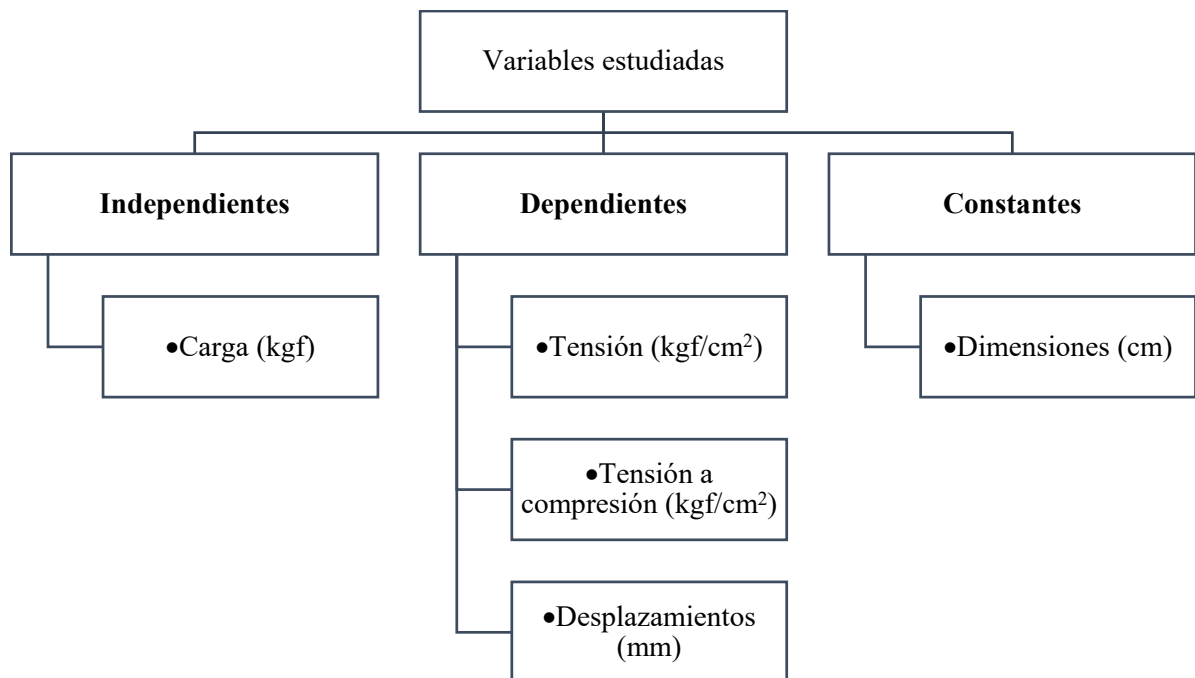
III.5. Accesorios empleados

- Potenciómetros /Acelerómetros / Cámaras digitales.

III.6. Herramientas empleadas

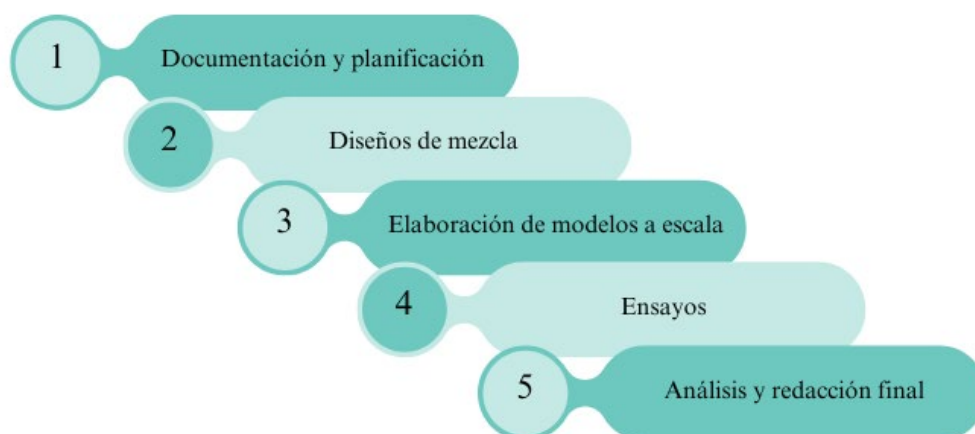
- Sujetadores sargentos / Martillo / Piqueta / Pinza de punta y corte / Nivel de burbuja / Vernier / Reglas y escuadras / Cúter.

III.7. Variables estudiadas



III.8. Fases de ejecución

El presente trabajo de grado fue desarrollado en cinco (5) fases como muestra la figura:



III.9. Estructuras construidas

III.9.1. Estructura tenségrica

III.9.1.1. Generalidades

Se determinó que la figura ideal para esta investigación estaría compuesta por dos piezas cuadradas, simétricas entre sí, que fueron identificadas como pieza superior e inferior debido a su posición al momento de equilibrio, y que se estabilizó por medio de 3 tirantes.

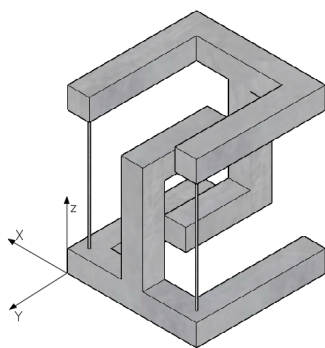
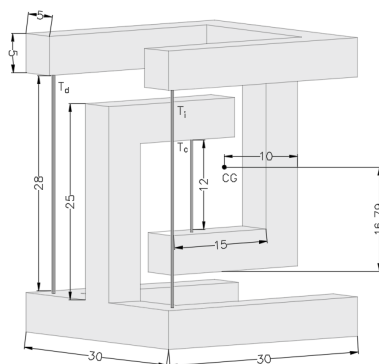


Figura 2. Modelado en SketchUp y modelo final de estructura tenségrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.1.2. Dimensiones

Se evidencia en la siguiente figura las dimensiones que poseen las piezas, así como la nomenclatura a utilizar en esta investigación respectiva a los tirantes:



Centro de gravedad - Pieza superior		
Y	20	cm
Z	16,79	cm
X	15	cm

Figura 3. Dimensiones en cm de la estructura tenségrica y nomenclatura de los tirantes.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.1.3. Mezcla

Se utilizó un mortero compuesto por cemento, agregados finos (tamices número 30, 50 y 100) y agua. La mezcla se diseñó basándose en un método empírico, donde se realizaron pruebas de diferentes dosificaciones de cemento, arena y agua, con el propósito de generar una mezcla fluida.

Tabla 1. Dosificación de mortero para vaciar una pieza de la estructura tenséfrica.

Volumen de mezcla - 1 Pieza			
Agregados	Cemento	2100	gr
	Retenido 100	280	gr
	Retenido 30	2940	gr
	Retenido 50	1960	gr
	Agua	2380	ml

Fuente: elaboración propia, 2023

Tabla 2. Masa de las piezas que conforman la estructura tenséfrica.

Masa de las piezas				
Masa pieza superior	5,764	kg	5764	gr
Masa pieza inferior	6,214	kg	6214	gr

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.1.4. Refuerzo

Para simular los aceros longitudinales y transversales se empleó un alambre de acero galvanizado y se reprodujo un armado de aceros que emulara uno real.

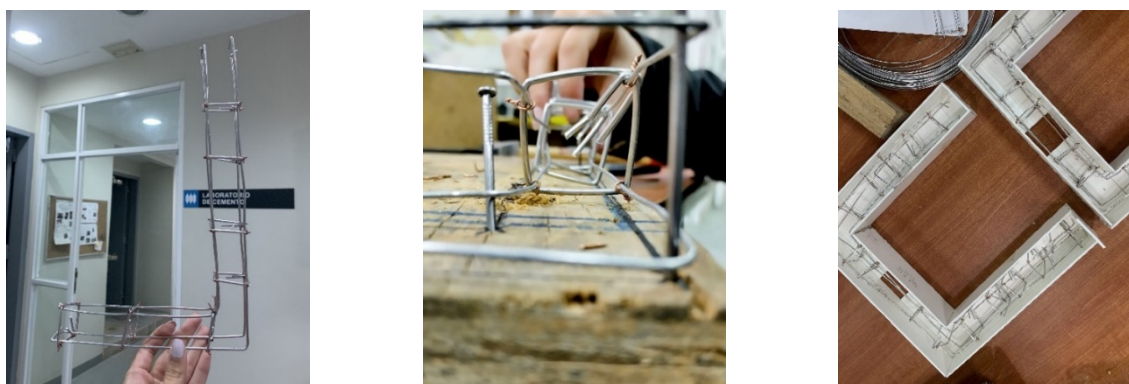


Figura 4. Armado de aceros de refuerzo de las piezas que conforman la estructura tenséfrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.1.5. Tirantes

Se emplearon 3 guayas de acero forradas de 1,7 mm de diámetro para tensar.

III.9.1.6. Proceso

El procedimiento llevado a cabo para realizar la estructura fue el siguiente:

1. Se determinó la geometría a utilizar mediante investigaciones y documentación previa.
2. Se seleccionó el material a utilizar para el encofrado.
3. Se armó el encofrado, asegurándose que todas las piezas del mismo encajaran de forma correcta para evitar errores posteriores de vaciado.
4. Se realizaron los armados respectivos al acero de refuerzo y se ubicaron en el encofrado.
5. Se midieron y ubicaron los tirantes, que fueron empotrados en la estructura y se diseñó el paso del extremo contrario de los mismos.
6. Se tamizó y pesó el material requerido para la mezcla de mortero.
7. Se realizó la mezcla de mortero.
8. Finalmente se vació la mezcla en el encofrado.
9. Posterior al fraguado de ambas piezas, se colocó cada pieza en su lugar y se procedió a tensar la estructura.



Figura 5. Proceso de vaciado de las piezas que conforman a la estructura tenségrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.2. Sistema atirantado - Puente

Se presenta el modelo referencial de un puente atirantado asimétrico, en el cual se basó la investigación.

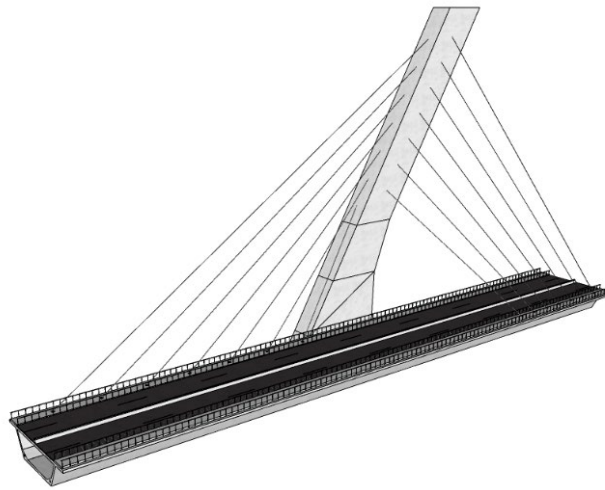


Figura 6. Hipótesis de diseño.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.2.1. Dimensiones

El predimensionado del puente se realizó en 3 partes, en primer lugar, el tablero, compuesto por una viga cajón, con una profundidad de 125 m, un ancho de 19,6 m y una altura de 4,5 m, estableciéndose un espesor de 0,4 m a todos los elementos que lo conforman.

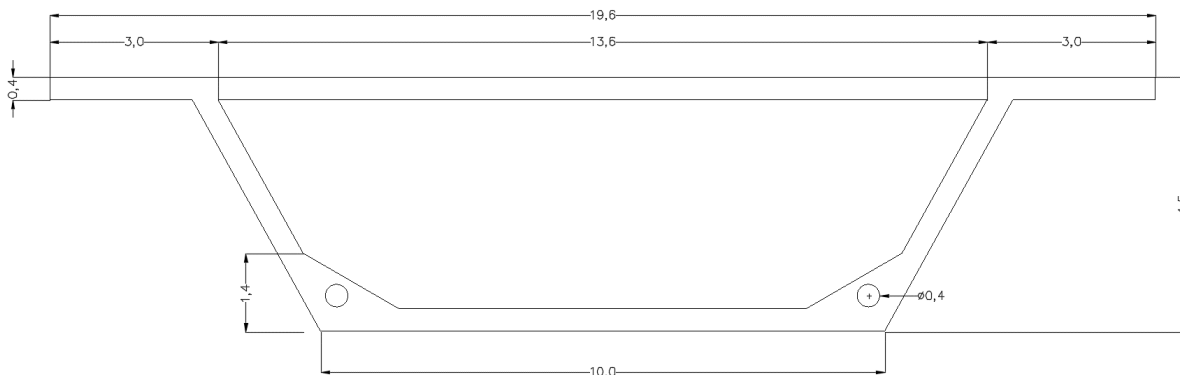


Figura 7. Corte transversal de la sección de la viga cajón del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

En segundo lugar, se diseñó el mástil que se erige con la finalidad de enlazar, mediante cables tensores, el tablero. Se estableció una longitud vertical de 70 m con un ángulo de inclinación de 60°.

Tabla 3. Altura del mástil.

Altura		
Alto (vertical)	70	m
Altura (inclinada)	80,6	m

Fuente: elaboración propia, 2023

Posteriormente, se dispusieron 7 tirantes por lado del mástil, que serían colocados al frente y al lateral de este y anclados al tablero como se evidenció en la hipótesis de diseño.

Adicionalmente se definió la posición del tablero respecto al mástil, con una altura de 10,5 m medidos desde el suelo hasta el tope de la pista y una luz libre de 53 m medida desde el extremo este hasta el primer punto de contacto entre el mástil y la pista.

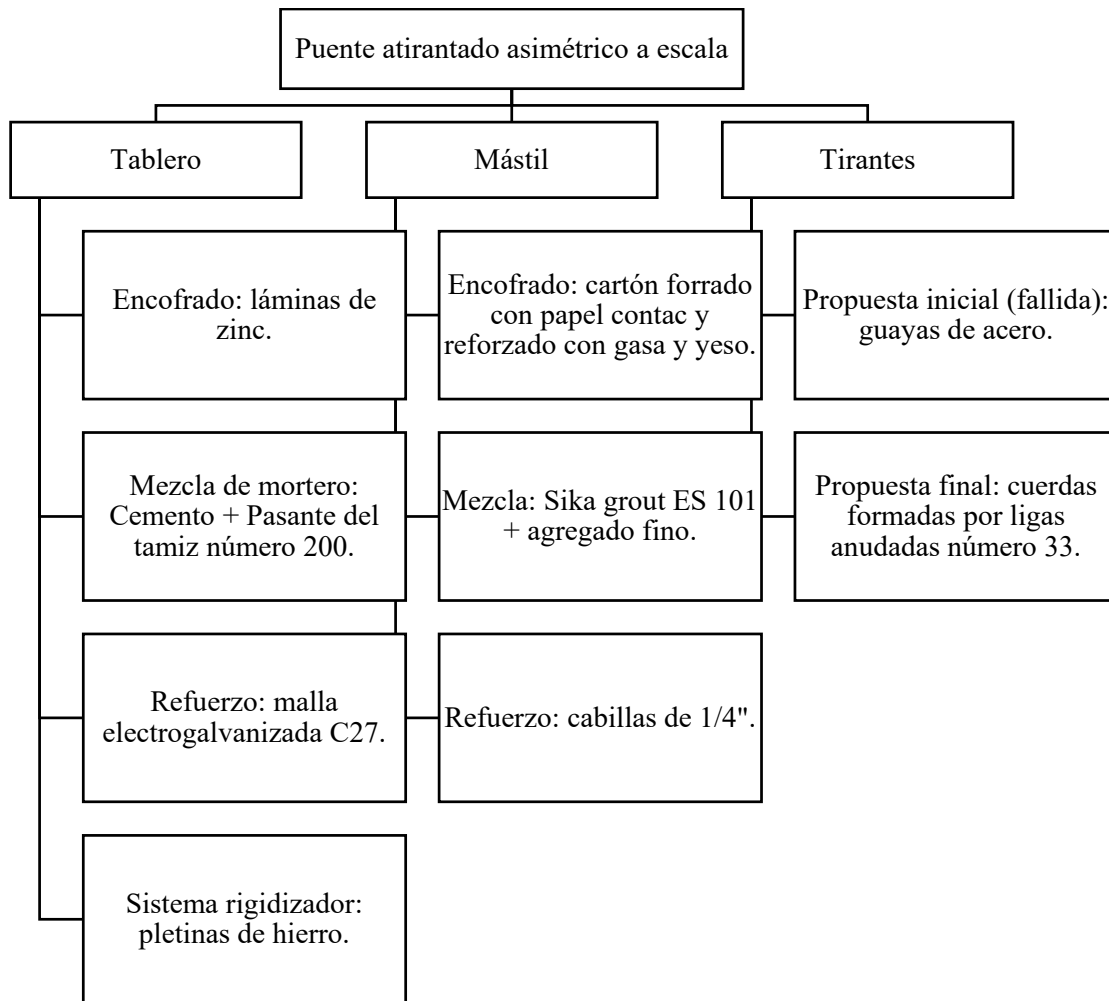
Es relevante acotar que el puente se apoya en el mástil en una extensión de 15,2 m. Con el propósito de evitar que este genere daños en el mástil, se optó por emplear un disipador de energía.

III.9.2.2. Escala

Se empleó una escala de 1:100 debido a su facilidad constructiva (Anexo B 5)

III.9.2.3. Modelo a escala

El modelo a escala del puente fue realizado en tres elementos principales, el tablero, mástil y posteriormente los tirantes. Como se muestra en el siguiente esquema:



A continuación, se presentan las figuras más representativas de las etapas constructivas:



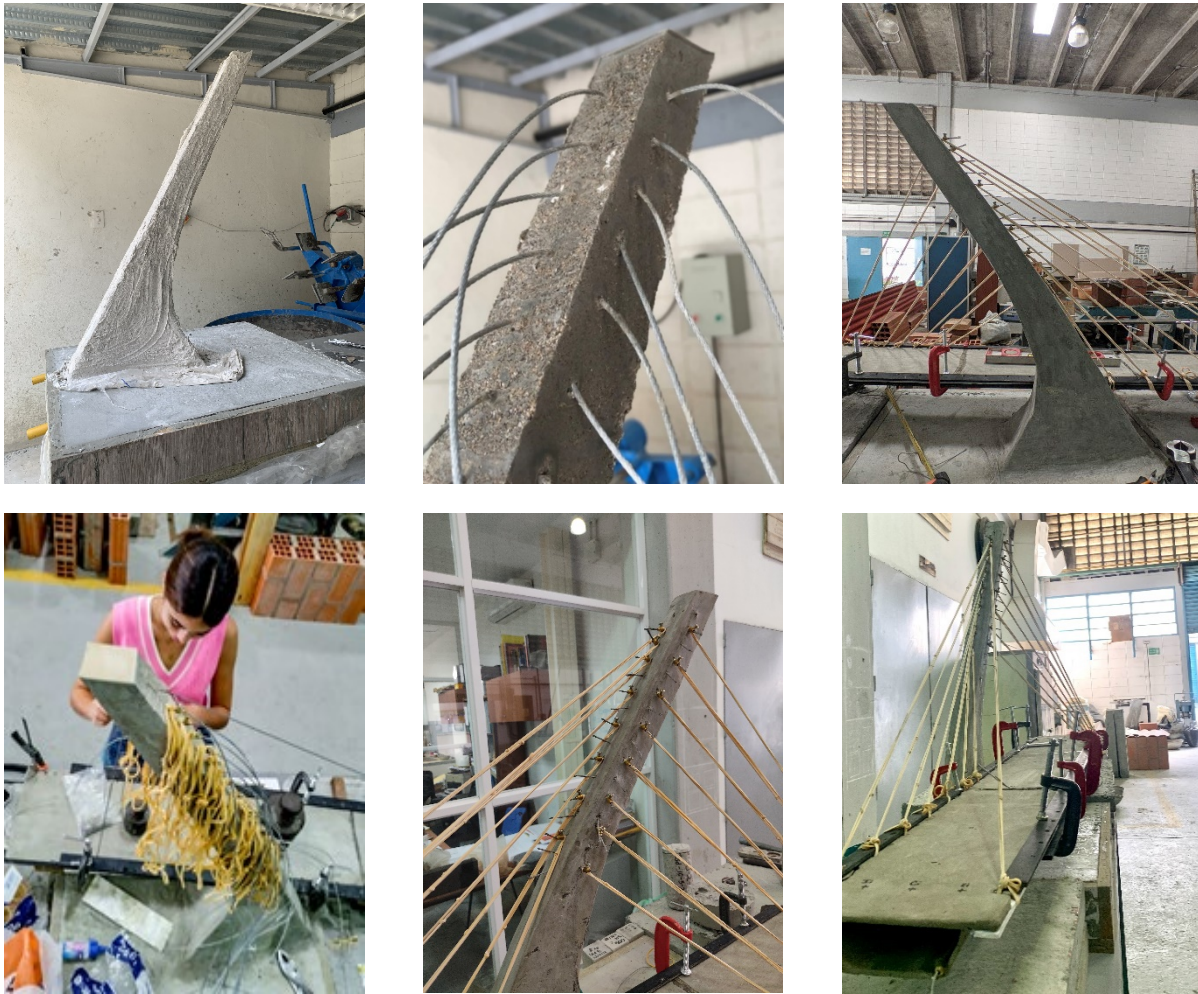


Figura 8. Etapas constructivas del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

Resulta de importancia resaltar que, en primera instancia, se propuso el uso de guayas de bicicleta como tirantes, sin embargo, resultó imposible obtener la tensión esperada por medio de un método manual, se interpretó que la razón se debió a su alto módulo de elasticidad, el cual se puede tomar como el módulo de elasticidad del acero de $2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$.

Debido a dichas complicaciones, se propuso realizar un cambio de material de los tensores a ligas, específicamente cuerdas generadas por ligas anudadas, las cuales, debido a su flexibilidad, permitieron el fácil tensado de la estructura. Es relevante destacar que el módulo de elasticidad de las ligas utilizadas es de $7,3 \text{ kgf/cm}^2$.

III.9.2.4. Solución de estabilidad

Con el fin de nivelar el sistema se colocaron tres (3) tirantes estabilizadores adicionales al diseño original:

- **Tirante estabilizador oeste (T_{eo}):** tiene como finalidad evitar la rotación del puente en su propio eje.
- **Tirante estabilizador este (T_{ee}):** tiene como finalidad bajar el extremo derecho del puente y elevar el izquierdo, por consecuencia.
- **Tirante estabilizador superior (T_{es}):** tiene como finalidad elevar el extremo izquierdo del puente.

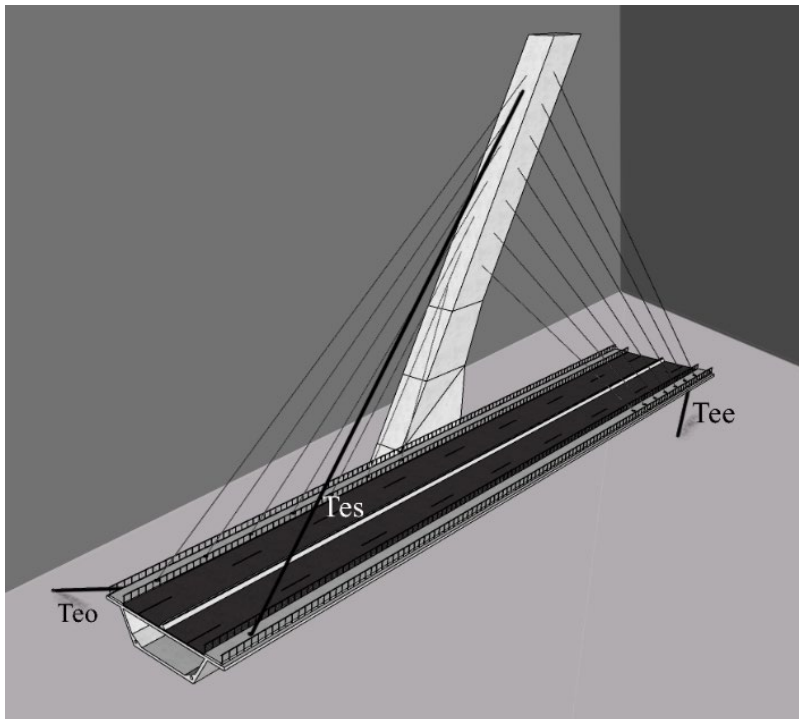


Figura 9. Tirantes estabilizadores.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.9.2.5. Proceso

Debido a la complejidad del proceso constructivo del mismo, se dividió en 3 partes: el tablero, el mástil, y el atirantamiento.

- **Tablero**

1. Se dimensionaron los elementos del puente a escala real según la norma LRFD AASHTO.
2. Se seleccionó la escala.
3. Se realizó la selección del material del encofrado y se diseñó el mismo.
4. Se hizo el diseño de mezcla.
5. Se realizó el vaciado de cada dovela del tablero de la siguiente forma:
 - a. Vaciado del cajón.
 - b. Vaciado del postensado.
 - c. Vaciado de losa superior del puente.
6. Se unieron las dovelas.

- **Mástil**

1. Se diseñó y dimensionó.
2. Se vació la fundación donde estaría apoyado.
3. Se escogió el material del encofrado y se realizó el molde.
4. Se estableció el sistema de refuerzo armado. Debido a que no se realizó en un único vaciado, se dejaron conectores de corte.
5. Se realizó el vaciado.

- **Atirantamiento**

1. Posterior al vaciado y fraguado de todas las piezas se ubicó el tablero en la posición adecuada respecto a la losa.
2. Se insertaron los tirantes en su posición establecida llevándolos a la tensión deseada.
3. Se soltó de su posición de equilibrio.
4. Se estableció la solución de estabilidad.

III.10. Modelados

III.10.1. Estructura tensébrica

III.10.1.1. Desplazamiento y aceleración

Se empleó el equipo de adquisición de datos “Dewesoft”. El modelado consistió en posicionar la estructura en su estado de equilibrio y mediante un hilo de nylon halar, hasta trasladar 1 cm la pieza superior de la estructura en la dirección “Y” generando una fuerza externa y soltar con la finalidad de obtener los valores más precisos de desplazamiento y aceleración a través del uso de un potenciómetro y un acelerómetro.



Figura 10. Montaje del sistema de modelado de la estructura tensébrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

III.10.1.2. Tensiones

Para el ensayo de determinación de las tensiones de la estructura tensébrica en estudio, se destensó uno de los tirantes externos y se aplicó carga en dicho punto hasta que la estructura llegó a su estado de equilibrio, repitiendo el procedimiento para el otro tirante externo. Respecto al tirante central, este se destensó y mediante un sistema de poleas se cargó hasta que la estructura de igual manera llegara a su estado de equilibrio.

III.10.2. Sistema atirantado - Puente

III.10.2.1. Tensiones

Para determinar las tensiones de los tirantes del puente (ligas), se midieron sus longitudes una vez el puente se encontraba en equilibrio, al conocerlas se logró obtener el valor de la carga a la que estaban sometidas mediante la calibración de las mismas, como se evidencia a continuación:



Figura 11. Calibración de las ligas.

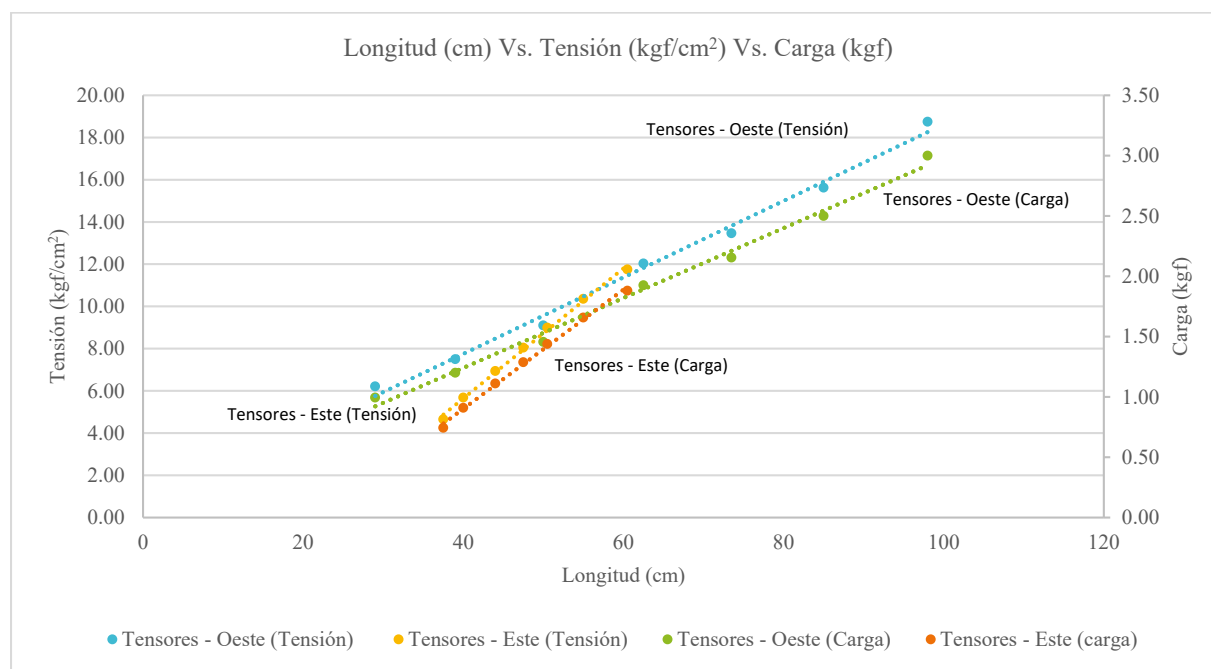
Fuente: elaboración propia, 2023

Posteriormente se empleó el método anteriormente descrito en la estructura tenségrica (sistema de poleas) con respecto a los tirantes estabilizadores para obtener las cargas requeridas.

Una vez obtenida la carga de cada uno de los tirantes del puente, se estableció un área nominal transversal de las ligas con la finalidad de obtener la tensión. Dicha área se obtuvo al medir la liga en ancho y espesor máximo que corresponde a su estado de reposo y el mínimo que corresponde al punto previo a la ruptura de la misma.

Consecutivamente se realizó un gráfico donde se evidenció el comportamiento de la longitud de los tensores contra la carga y tensión. Se observa que ambos comportamientos siguen una tendencia lineal debido a que son proporcionales, donde en ambos casos la tensión aumenta en función de la longitud.

Gráfica 1. Longitud de tirantes (ligas) contra tensión (kgf/cm²) y carga (kgf).



Fuente: elaboración propia, 2023

Por último, con la finalidad de obtener valores representativos de las tensiones, se modeló el puente ante una sobrecarga en 6 ubicaciones a lo largo del mismo, como se evidencia en la siguiente figura:

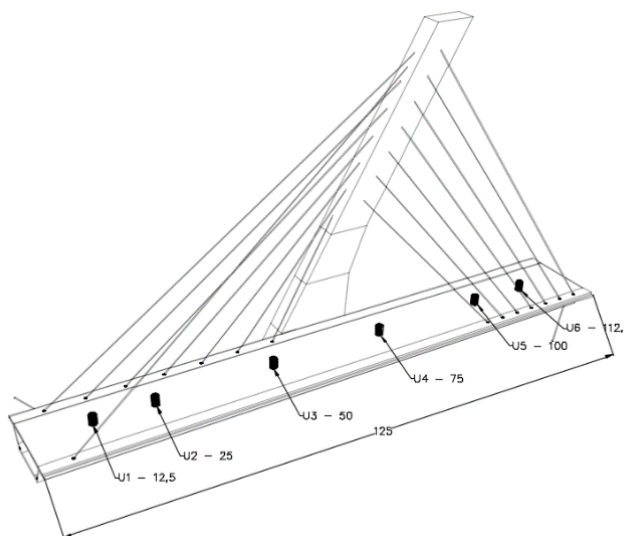


Figura 12. Ubicación de la sobrecarga a lo largo del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

CAPÍTULO IV

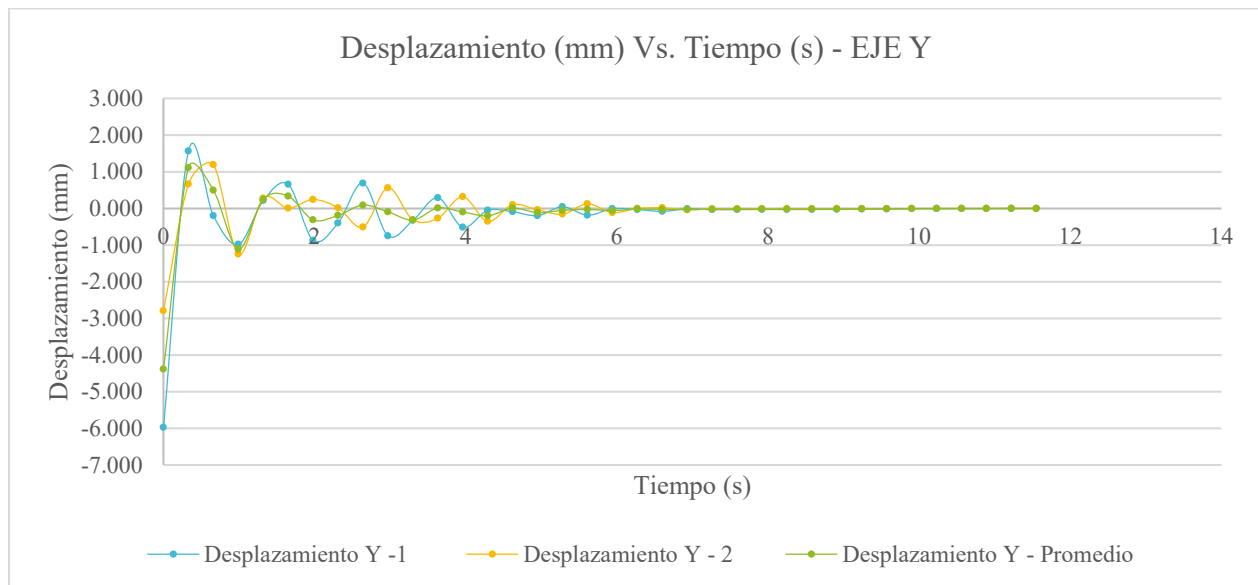
RESULTADOS Y ANÁLISIS

IV.1. Estructura tenségrica

IV.1.1. Evaluación del desplazamiento

Se obtuvieron los resultados del desplazamiento de la estructura en el sentido “Y”, correspondiente a la dirección de la excitación, como se muestra a continuación:

Gráfica 2. Desplazamiento de la pieza tenségrica en el eje Y contra el tiempo.



Fuente: elaboración propia, 2023

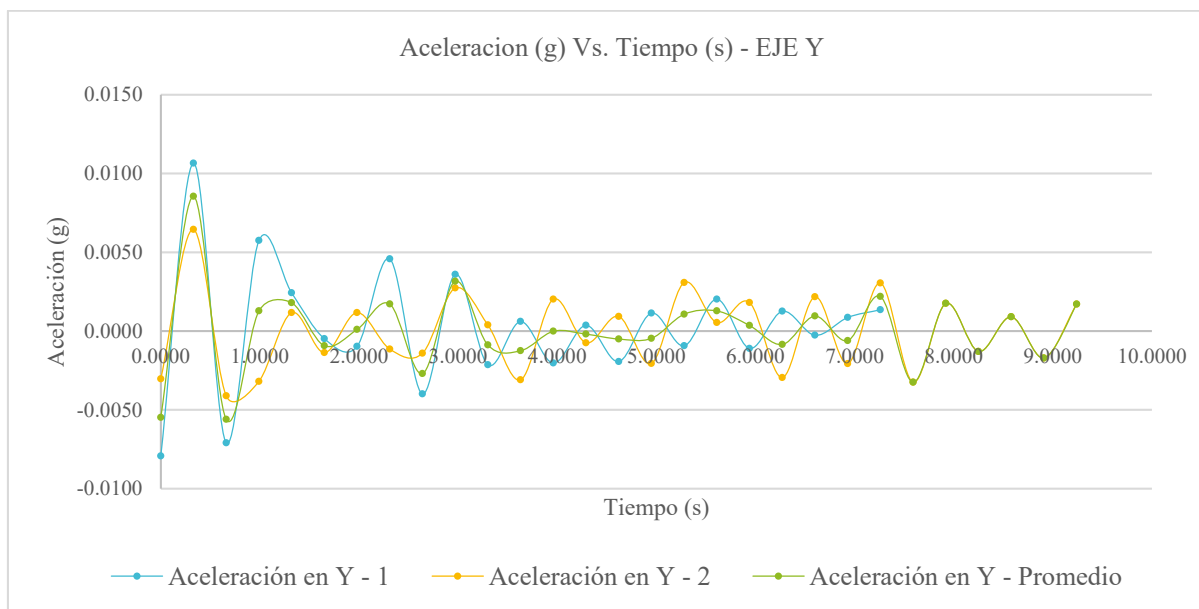
En la gráfica N°2, se observa un comportamiento armónico oscilatorio amortiguado en un sistema oscilador de 1 Grado de Libertad. Donde la amortiguación es la absorción de energía por el efecto del movimiento en el sistema, producido por fricción entre los elementos causando así pérdida de las propiedades en los materiales.

Se percibe que, la mayor amplitud, correspondiente al desplazamiento ocurre al inicio del movimiento y que una oscilación se realiza en aproximadamente 1 segundo. Asimismo, se advierte que el desplazamiento disminuye progresivamente hasta que la pieza se detiene, evidenciando así un periodo de amortiguamiento de 11,22 segundos.

IV.1.2. Aceleración

Posterior a la obtención del desplazamiento se obtuvo la aceleración en la dirección respectiva, como se evidencia en la siguiente gráfica:

Gráfica 3. Aceleración de la pieza tenséfrica en el eje Y contra el tiempo.



Fuente: elaboración propia, 2023

Se observa un comportamiento oscilatorio, consecuente de la proporcionalidad entre el desplazamiento y la aceleración en función del tiempo, donde la misma alcanza su valor máximo a 0,33 segundos del inicio del movimiento.

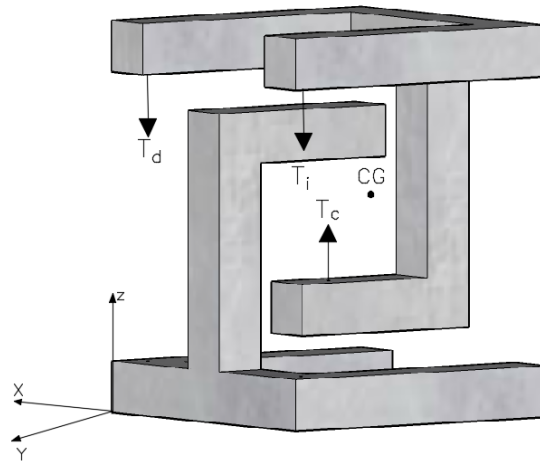
IV.1.3. Tensiones

Se obtuvieron las tensiones de cada cable, como se detalló anteriormente, obteniendo la siguiente información:

Tabla 4. Tensiones obtenidas del ensayo de la estructura tenséfrica en kgf/cm².

Tensiones		
(T _d)	66,62	kgf/cm ²
(T _i)	66,62	kgf/cm ²
(T _c)	379,77	kgf/cm ²

Fuente: elaboración propia, 2023



T_d	66,62	kgf/ cm ²
T_i	66,62	kgf/ cm ²
T_c	379,77	kgf/ cm ²

Figura 13. Tensiones de la estructura tenségrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

Debido a la configuración de los tirantes, se evidencia que el cable central (T_c) posee una tensión cinco (5) veces mayor que los tirantes externos, esto se debe, en primer lugar, a que el mismo se encuentra adyacente al centro de gravedad de la pieza y por consiguiente desempeña el rol de elevar la misma, mientras que los tirantes externos (T_d y T_i) le proporcionan estabilidad al sistema, sin embargo, no actúan como soporte principal del conjunto.

Igualmente es importante destacar que, aunque en un supuesto teórico, el tensor central podría alzar la pieza superior del todo, este no proporciona la estabilidad necesaria, por lo cual es imprescindible la presencia del tirante central y los dos (2) tirantes externos, simétricos entre sí, a la tensión requerida, en todo momento, de lo contrario la estructura no alcanzará su estado de equilibrio.

IV.1.3.1. Variación de tensiones

Mediante la prueba de desplazamiento anteriormente descrita, se obtuvo la variación de las tensiones durante el movimiento, donde al alcanzar su desplazamiento máximo los tres (3) tensores se inclinan 5° respecto a la vertical (posición de equilibrio).

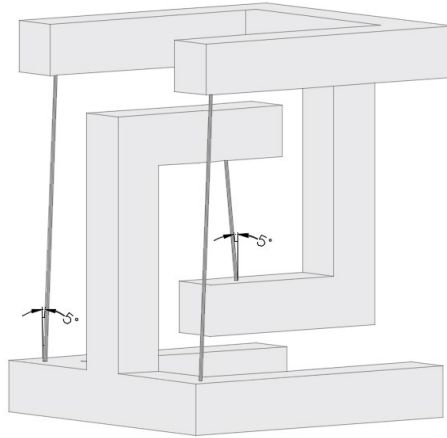
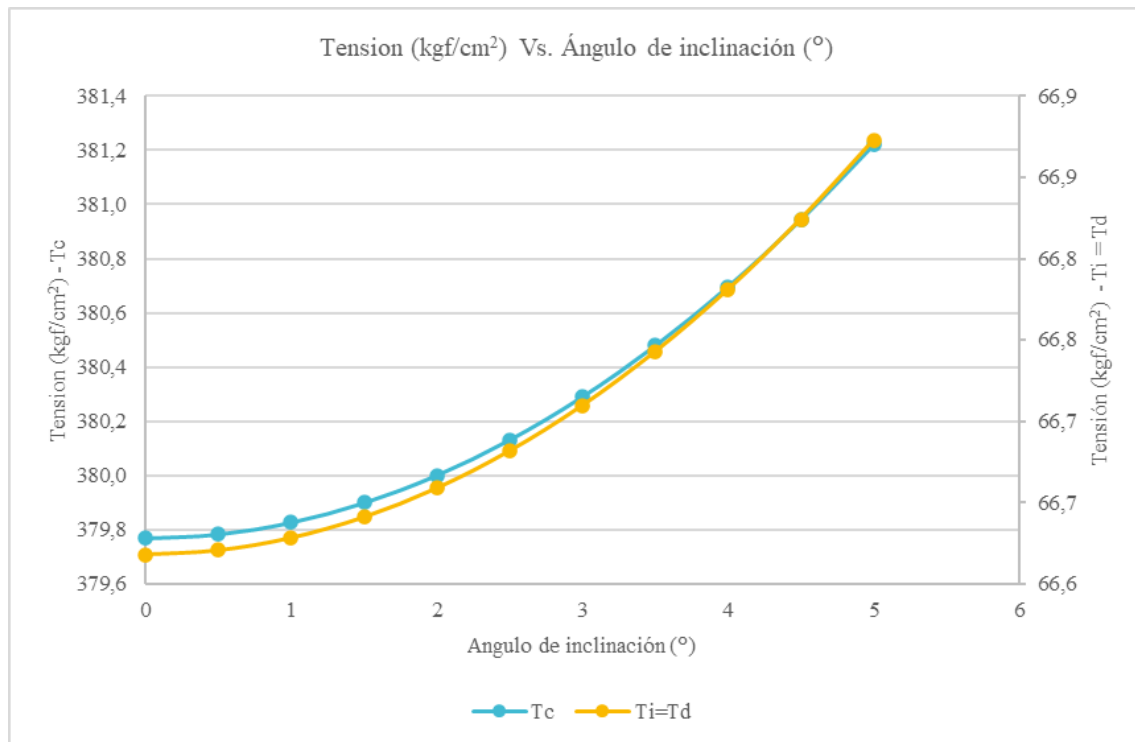


Figura 14. Ángulo de los cables tensores de la estructura tenségrica en el máximo desplazamiento.

Fuente: elaboración propia, 2023

Gráfica 4. Variación de las tensiones durante el desplazamiento, en función del ángulo.



Fuente: elaboración propia, 2023

Se evidencia un comportamiento exponencial en la gráfica mostrada, esto debido a que, la tensión aumenta a medida que el ángulo se incrementa, alcanzando la tensión máxima de los cables respectiva a un ángulo de 5° ante la aplicación de la carga, sin variar la longitud de los mismos. Se

puede evidenciar que los tensores externos poseen una menor tensión en las posiciones evaluadas, tal como se observó en el estado de equilibrio.

IV.1.4. Condición de estabilidad.

La geometría resulta el factor más significativo al caracterizar la estabilidad del sistema, por lo que las piezas que conforman la estructura deberán ser simétricas entre sí, debido a que estas resultan figuras quirales, una vez la misma se encuentra en equilibrio, lo que se traduce en que la estructura consta de dos piezas de igual geometría, pero dispuestas en sentido inverso.

Debido a la configuración dispuesta para la investigación las dimensiones deberán ser semejantes y con masas equivalentes, ya que si alguno de los factores dista de la proximidad deseada se generará la inestabilidad de la estructura. Además, para que la estructura se mantenga estable, debe existir una conexión entre todos los elementos, en este caso a través de los cables, por lo cual se considera un sistema continuo.

Adicionalmente los cables que componen la estructura deben ser rectos ya que, al tener una pendiente pronunciada, una componente bien sea horizontal o vertical será mayor que la otra, lo que produce un desequilibrio de las fuerzas en dicha dirección y por consecuencia el desequilibrio total de la estructura.

A través del análisis de los modelados realizados se caracterizó el sistema estructural construido de la estructura tenségrica y se evaluó su comportamiento a nivel tensional, debido a esto, se afirma que el segundo objetivo del presente trabajo se cumplió. Seguidamente se realizó el análisis correspondiente al tercer objetivo, relacionado al sistema atirantado (puente atirantado a escala).

IV.2. Sistema Atirantado – Puente

IV.2.1. Tensiones

Se obtuvieron los valores de tensión para los tres tirantes estabilizadores del puente y la fuerza por unidad de área en la zona donde el tablero posee contacto con el mástil, en su condición de equilibrio, sin carga añadida, como se evidencia a continuación:

Tabla 5. Tensión y carga de los tirantes estabilizadores en la condición de equilibrio del sistema.

Tensión y carga de los tirantes - Estabilizadores				
Nombre de tirante	Longitud cm	Área cm ²	Carga kgf	Tensión kgf/ cm ²
Estabilizador este	10,30	0,03142	11,77	374,60
Estabilizador oeste	24,20	0,03142	1,99	63,34
Estabilizador superior	97,5	0,160	2,90	18,13
Mástil	-	12,16	1,35	0,11

Fuente: elaboración propia, 2023

Se muestra entonces, de forma gráfica el valor de las tensiones de todos los tirantes que inciden en la estabilidad del puente en su estado de equilibrio.

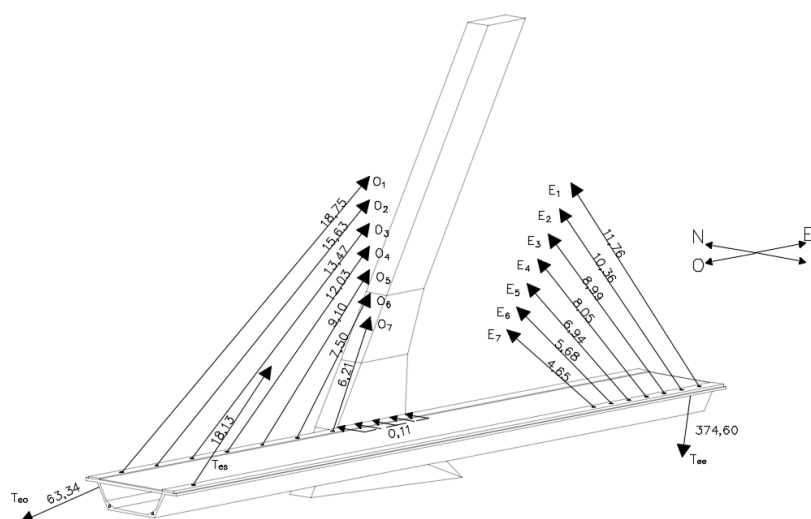


Figura 15. Tensiones de los cables en el estado de equilibrio.

Fuente: elaboración propia, 2023

Se observa que la mayor tensión por unidad de área corresponde al tirante estabilizador este (T_{ee}), debido a que tiene como función evitar que la zona este del tablero se eleve por acción de los tirantes principales del puente. Por ende, el tensor debe absorber la mayor carga para generar la estabilidad requerida.

En segundo lugar, se encuentra el estabilizador oeste (T_{eo}) que tiene como finalidad posicionar el tablero paralelo al mástil, evitando así el giro del mismo sobre su propio eje, sin

embargo, también genera un descenso en la zona oeste del mismo, por consecuencia el estabilizador superior (T_{es}) tiene como función elevar dicha zona, generando un efecto contrario a T_{eo} .

Por último, la carga generada sobre el mástil por unidad de área es la menor del conjunto, esto se debe a que la superficie de contacto del mástil con el puente es de 15,2 cm y el espesor del tablero en la zona de contacto es de 0,8 mm, por ende, la tensión ejercida sobre el mástil se ve distribuida en su extensión.

IV.2.2. Sobrecarga

Se realizó un ensayo de sobrecarga en las ubicaciones detalladas anteriormente con la finalidad de observar el comportamiento de los tensores del puente, en donde se extrajeron los datos respectivos de cargas de los tensores estabilizadores que generan la posición de equilibrio ante dicha sobrecarga, para posteriormente obtener las tensiones que se muestran a continuación:

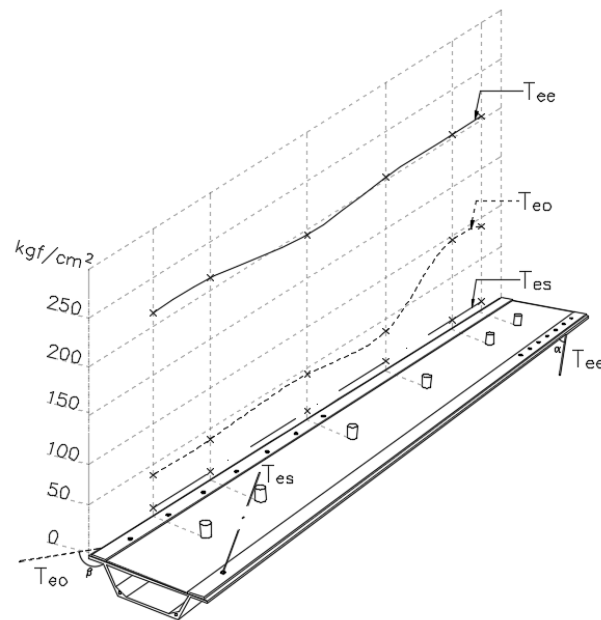


Figura 16. Ubicación de la carga contra tensión de los tirantes estabilizadores.

Fuente: elaboración propia, 2023

En la gráfica se aprecia que, cuando la sobrecarga se encuentra en el extremo oeste del puente (Ubicación 1) este solicita la mayor tensión registrada en el T_{ee} , esto se debe a que se requiere mayor fuerza para compensar la inestabilidad generada por dicha sobrecarga. Respecto a

la carga que genera el tablero sobre la zona de contacto en el mástil, se registró un valor de 0,49 kgf/cm² y para el T_{es} de 18,21 kgf/cm². En contraparte, el tensor T_{eo} registró la menor carga (24,32 kgf/cm²), consecuencia de que la sobrecarga aplicada se encontraba en el punto más próximo a este último.

Respecto al segundo punto este se comporta de manera similar al primero, donde los tensores más alejados al punto de aplicación de la sobrecarga registran las mayores cargas y los cercanos las menores, sin embargo, se observa un aumento en la carga correspondiente a T_{eo} respecto al punto anterior, debido a que la carga se encuentra más alejada del extremo oeste.

De forma consiguiente en los puntos tres y cuatro se evidenció una disminución en los requerimientos tensionales del T_{ee} y un aumento en los del T_{eo}, así como el menor registro de carga aplicada sobre el mástil, esto debido a que las cargas ubicadas en el centro del tablero son aquellas que generan las menores sollicitaciones de estabilidad.

En los puntos finales (5 y 6), se observó un aumento de carga en el tensor T_{eo}, esto debido a que, la sobrecarga aplicada en la zona este del sistema genera un desplazamiento vertical hacia abajo, elevando por consecuencia el extremo contrario, lo cual conlleva a que el tensor requiera de una mayor carga con la finalidad de contrarrestar dicho efecto. Así mismo es importante evidenciar la disminución de carga sobre el T_{ee} debido a que la carga aplicada cerca del mismo genera una menor sollicitación.

Es relevante recalcar que el tensor T_{es} presenta una menor tensión, ya que el área del mismo se conforma por ligas de mayor área transversal respecto a las guayas de los demás tensores mencionados.

IV.2.3. Condición de estabilidad.

En los sistemas atirantados la condición principal de estabilidad se vincula con el correcto funcionamiento de los tensores que conforman el sistema, es decir estos deben trabajar en su máximo estado de tensión, con la finalidad de que el mástil, por medio de los tirantes, logre absorber las cargas que recaen sobre el puente logrando comprimir el tablero, rigidizándolo y por ende aportándole una mayor resistencia.

Asimismo, el mástil debe ser construido con una esbeltez proporcional al alcance de los tirantes y a la luz a cubrir, debido a que este es el encargado de transmitir las acciones verticales al suelo y por ende es el responsable de la estabilidad del sistema.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1. Conclusiones

El presente estudio, consistió en analizar el comportamiento de estructuras tensadas por medio de modelos a escala, los cuales estuvieron conformados por una estructura tensébrica y un modelo a escala de un puente atirantado asimétrico en mortero. Ambas estructuras fueron modeladas empleando métodos empíricos con la finalidad de obtener información sobre el estado de las tensiones en diversas condiciones.

Por medio del modelado de la estructura tensébrica se evidenció que, al desplazar la misma a causa de una fuerza excitadora, se produjo un movimiento oscilatorio amortiguado, donde, al momento de aplicar la excitación, se observó la mayor tensión en los cables que conforman el sistema y la menor en la posición de equilibrio.

Se pudo concluir respecto a la estructura tensébrica que su estado de equilibrio depende en su mayoría de la geometría, asimismo se estableció que, para que el sistema funcione correctamente todos los miembros tensionales (cables tensores) deberán estar a la tensión requerida por el sistema, de lo contrario el mismo perderá su estabilidad.

De igual manera, se destaca que al momento de la hipótesis de diseño el sistema atirantado, correspondiente al puente asimétrico, resultaba inestable, por lo que se optó por proponer una solución de estabilidad, la cual implicó la adición de tres tirantes estabilizadores, logrando así que el sistema se mantuviera estable en la posición deseada. Posteriormente, al modelar dicho sistema mediante condiciones de sobrecarga, se demostró que la mayor tensión corresponde en todo momento al tensor T_{ee} pues requiere una mayor fuerza para desplazar el tablero en dirección vertical descendente, esto debido a su ubicación, pues los tensores de la zona este poseen mayor proximidad entre ellos en sus puntos de inserción en el tablero, por lo tanto, la fuerza que ejercen se concentra en dicha zona. Consecuentemente el tensor T_{es} evidencia tensiones de menor magnitud debido a que este tiene como función elevar la zona oeste del tablero consecuencia de la tensión ejercida por T_{eo} .

Con relación al comportamiento de los tensores estabilizadores ante una sobrecarga ubicada en diferentes posiciones a lo largo del tablero, se concluyó que estos requieren de menor tensión para compensar la desestabilización causada, al compararlos con las tensiones en el estado de equilibrio, sin embargo, en las condiciones donde la sobrecarga se encontraba en los extremos del tablero, se registraron las mayores tensiones, comparativamente a las situaciones donde se aplicó la carga cerca del centro del tablero.

Finalmente se concluye que, en puentes atirantados asimétricos se presenta una mayor complejidad en cuanto a la distribución de fuerza en sus tensores, por lo que es necesario un modelado a través de diversas condiciones de carga con la finalidad de comprender su comportamiento.

V.2. Recomendaciones

Considerando que las estructuras tenségricas poseen un campo a investigar muy amplio y se encuentran en continuo cambio y evolución gracias a los distintos avances que se están incorporando actualmente, se recomienda evaluar diferentes geometrías con la finalidad de comparar el comportamiento de las tensiones ante diferentes casos de cargas aplicadas.

Igualmente se invita a realizar una comparación respectiva al sistema atirantado mediante la utilización de un software (modelo analítico) que simule el puente atirantado en estudio en la realidad, donde se observen las tensiones requeridas ante distintas condiciones de operación y carga, tal como efectos dinámicos causados por vehículos, viento e incluso sismos que podrían ser agregados como continuación de la investigación.

Asimismo, resultaría de provecho realizar otro modelo en mortero, a una escala menor (mayores dimensiones) con la finalidad de sustituir las ligas por elementos con mayor similitud a los tirantes de acero utilizados en la realidad, donde se permita generar la tensión máxima por métodos utilizados en el proceso constructivo de este tipo de sistemas a escala.

BIBLIOGRAFÍA

- Cardoza Quijada, M., Villalobos Zetino, J. (2005). *Evaluación estructural de un puente mediante la realización de una prueba de carga estática*. [TEG, Universidad de El Salvador]. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4554/1/Evaluaci%C3%B3n%20estructural%20de%20un%20puente%20mediante%20la%20realizaci%C3%B3n%20de%20una%20prueba%20de%20carga%20est%C3%A1tica.pdf>
- Gamboa, Mamerto. (2011). *Estructuras tensegríticas: nueva tipología estructural para el siglo XXI*. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/76/783/a783.pdf>
- Gómez, Valentín. (s.f.). *Tensegridad, estructuras de compresión flotante*. Habidite projects. http://www.tensegridad.es/Publications/Tensegridad-Estructuras_De_Compresi%C3%B3n_Flotante_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf
- Manzano Suárez, M., Pérez Nolivos R. (2012). *Análisis y diseño de un puente atirantado, ubicado en la provincia de esmeraldas sobre el río Atacames*. [TEG, Escuela politécnica nacional, Quito]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4803/1/CD-4394.pdf>
- Norma COVENIN 2004 (1998). *Terminología de las normas COVENIN-MINDUR de edificaciones*. (Caracas). www.fau.ucv.ve/idec/normas_construccion/Norma2004_98_TERMINOLOGIA.pdf
- Pauletti, Ruy. (2011). *Anotaciones sobre el proyecto y el análisis de las estructuras tensadas*. Revista Entre Rayas (Caracas), N. 88, p. 30-41, 2011. Revista Entre Rayas - ISSN 1316-0257. 88. 30-41.
- Sainz, Jorge. (1990). *El dibujo de arquitectura*. Editorial NEREA, S.A. (Madrid). https://oa.upm.es/45562/1/El_dibujo_de_arquitectura.pdf

ANEXO A - TABLAS

Anexo A 1. Volumen de las piezas que conforman la estructura tenségrica.

Volumen		
"U"		
U (Base - Completa)	4500	cm ³
U (Resta - Hueco)	2500	cm ³
Volumen U (Base)	2000	cm ³
"L"		
Alto	750	cm ³
L	500	cm ³
Volumen total	3250	cm³

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 2. Longitud de los tirantes de la estructura tenségrica.

Longitud de tirantes		
Tc	12	cm
Te	28	cm

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 3. Cálculo del área de los cables tensores de la estructura tenségrica.

Características de los tirantes		
Diámetro	0,17	cm
Área	0,023	cm ²

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 4. Desplazamiento en el eje Y de la pieza tenségrica.

Desplazamiento en Y			
Tiempo	1º repetición	2º repetición	Desplazamiento promedio
	Desplazamiento		
s	mm	mm	mm
0	0,066	3,970	2,018
0,33	7,607	7,422	7,514
0,66	5,844	7,955	6,900
0,99	5,061	5,518	5,289
1,32	6,257	7,039	6,648
1,65	6,700	6,769	6,734

1,98	5,171	7,006	6,088
2,31	5,643	6,779	6,211
2,64	6,732	6,256	6,494
2,97	5,292	7,323	6,308
3,3	5,717	6,451	6,084
3,63	6,333	6,494	6,414
3,96	5,528	7,082	6,305
4,29	5,990	6,409	6,199
4,62	5,952	6,865	6,408
4,95	5,846	6,727	6,286
5,28	6,089	6,606	6,347
5,61	5,858	6,888	6,373
5,94	6,035	6,649	6,342
6,27	6,010	6,762	6,386
6,6	5,962	6,782	6,372
6,93	6,030	6,721	6,375
7,26	6,009	6,751	6,380
7,59	6,011	6,753	6,382
7,92	6,013	6,754	6,383
8,25	6,013	6,754	6,384
8,58	6,013	6,755	6,384
8,91	6,017	6,754	6,386
9,24	6,023	6,756	6,390
9,57	6,026	6,757	6,392
9,9	6,035	6,759	6,397
10,23	6,036	6,762	6,399
10,56	6,038	6,762	6,400
10,89	6,038	6,762	6,400
11,22	6,041	6,762	6,402
11,55	6,042	6,762	6,402

Fuente: Extraído del procesador de datos DEWEsoft.

Anexo A 5. Aceleración en el eje Y de la pieza tenségrica.

Aceleración en el eje Y					
Tiempo s	1º repetición		2º repetición		Aceleración Promedio g
	Aceleración g	Aceleración m/s ²	Aceleración g	Aceleración m/s ²	
0,0000	-0,0079	-0,07773	-0,0030	-0,02982	-0,0055
0,3300	0,0107	0,10449	0,0064	0,06324	0,0086

0,6600	-0,0071	-0,06958	-0,0041	-0,04036	-0,0056
0,9900	0,0057	0,05635	-0,0032	-0,03132	0,0013
1,3200	0,0024	0,02382	0,0012	0,01145	0,0018
1,6500	-0,0005	-0,00473	-0,0014	-0,01348	-0,0009
1,9800	-0,0010	-0,00953	0,0012	0,01148	0,0001
2,3100	0,0046	0,04497	-0,0011	-0,01125	0,0017
2,6400	-0,0040	-0,03911	-0,0014	-0,01384	-0,0027
2,9700	0,0036	0,03527	0,0027	0,02676	0,0032
3,3000	-0,0021	-0,02105	0,0004	0,00376	-0,0009
3,6300	0,0006	0,00595	-0,0031	-0,03042	-0,0012
3,9600	-0,0020	-0,01995	0,0020	0,01978	0,0000
4,2900	0,0004	0,00358	-0,0007	-0,00734	-0,0002
4,6200	-0,0019	-0,01897	0,0009	0,00912	-0,0005
4,9500	0,0011	0,01117	-0,0021	-0,02023	-0,0005
5,2800	-0,0009	-0,00918	0,0031	0,03021	0,0011
5,6100	0,0020	0,01986	0,0005	0,00525	0,0013
5,9400	-0,0011	-0,01080	0,0018	0,01777	0,0004
6,2700	0,0013	0,01233	-0,0030	-0,02900	-0,0008
6,6000	-0,0003	-0,00262	0,0022	0,02131	0,0010
6,9300	0,0009	0,00849	-0,0021	-0,02033	-0,0006
7,2600	0,0014	0,01328	0,0030	0,02986	0,0022
7,5900			-0,0032	-0,03186	-0,0032
7,9200			0,0018	0,01721	0,0018
8,2500			-0,0013	-0,01272	-0,0013
8,5800			0,0009	0,00889	0,0009
8,9100			-0,0017	-0,01681	-0,0017
9,2400			0,0017	0,01676	0,0017

Fuente: Extraído del procesador de datos DEWEsoft.

Anexo A 6. Predimensionado de la pista del puente atirantado.

Predimensionado		
Nº de vias por lado	1	m
Calzada	3,6	m
Hombrillo	2,7	m
Ancho Típico Peatonal	2	m
Borde Seguridad	0,5	m
Espacio Tirantes	0,5	m
Espacio Alumbrado (Divisoria)	1	m
Ancho Total Vía	19,6	m

Largo	125	m
Ancho	19,6	m
Profundidad (Secc. Transv)	4,50	m

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 7. Definición de la viga tipo cajón del puente atirantado.

Definición de la viga cajón		
Luz libre apoyos (Extremo derecho- Apoyo)	53,00	m
$h \geq 0,040 * (\text{luz libre del puente})$	4,50	m
N ° de cajones	1,00	#
Volados (a cada extremo)	3,00	m
Ancho losa superior (cajón)	13,60	m
Ancho losa inferior	8,40	m
Angulo de almas externas	60,00	°

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 8. Cálculo de espesores del tablero del puente.

Espesores		
Losa Superior		
Espesor Mínimo	175	mm
Espesor + Seguridad	188	mm
$h(tf) \geq 1/20 * (\text{luz libre entre almas})$	400	mm
Espesor Losa Superior (htf)	400	mm
	0,40	m
Losa Inferior		
Espesor Mínimo	140	mm
$h(bf) \geq 1/30 * (\text{luz libre entre almas})$	280	mm
$h(tf) \text{ mayor } 1/30 * (\text{luz efectiva entre almas})$	280	mm
Espesor Losa Inferior (hbf)	280	mm
	0,28	m
Almas o Nervaduras		
Espesor Mínimo (b)	0,3	m

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 9 . Dimensiones de la base del mástil.

Base (Trapezial)		
Base mayor	15	m

Base menor	4,5	m
Longitud de arco (curva)	15,3	m
Altura	29	m

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 10. Dimensiones del tope del mástil.

Tope (Rectangular)		
Base mayor	4,5	m
Base menor	4,5	m
Altura	5	m

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 11. Dimensiones de la curva lateral del mástil.

Lateral		
<i>Se compone de 3 rectas de 10 cm de altura (medida en vertical) cada una para simular la curva</i>		
<i>Recta n° 1</i>		
Altura (vertical)	10	m
Ancho (Horizontal)	15	m
<i>Recta n° 2</i>		
Altura (vertical)	20	m
Ancho (Horizontal)	10,5	m
<i>Recta n° 3</i>		
Altura (vertical)	30	m
Ancho (Horizontal)	8,6	m

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 12. Dimensiones de la curva posterior del mástil.

Posterior		
<i>La sección posterior está compuesta por una curva cóncava hasta los 10 m y un ancho constante de 4,5 m posteriormente</i>		
<i>Curva n° 1</i>		
Altura (vertical)	10	m
Ancho (Horizontal)	6	m
<i>Recta n° 2</i>		
Altura (vertical)	20	m
Ancho (Horizontal)	4,5	m
<i>Recta n° 3</i>		
Altura (vertical)	30	m

Ancho (Horizontal)	4,5	m
--------------------	-----	---

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 13. Área nominal del tirante conformado por ligas.

Área nominal de la liga		
Área en estado inicial	0,24	cm ²
Área en estado elongado	0,08	cm ²
Área nominal	0,16	cm ²

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 14. Cálculo del módulo de elasticidad del tensor de ligas.

Módulo de elasticidad (Liga)		
Longitud inicial	26,67	cm
Longitud final	85,00	cm
Delta Long	58,33	cm
Tensión	15,94	kgf/cm ²
Deformación	2,187	-
Módulo de elasticidad	7,29	kgf/cm ²

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 15. Área de los tensores estabilizadores (guayas)

Área de tirantes		
Diámetro	0,2	cm
Área	0,0314	cm ²

Fuente: Elaboración propia,2023

Anexo A 16. Tensiones y cargas de tirantes (corregidos) – Oeste

Tensión y carga de los tirantes Oeste			
Nº de tirante #	Longitud cm	Carga Kgf	Tensión Kgf/cm ²
O ₁	98	3,00	18,75
O ₂	85	2,50	15,63
O ₃	73,5	2,16	13,47
O ₄	62,5	1,93	12,03
O ₅	50	1,46	9,10
O ₆	39	1,20	7,50
O ₇	29	0,99	6,21

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 17. Tensiones y cargas de tirantes (corregidos) – Este

Tensión y carga de los tirantes			
<i>Este</i>			
Nº de tirante	Longitud	Carga	Tensión
#	cm	Kgf	Kgf/cm²
E ₁	60,5	1,88	11,76
E ₂	55	1,66	10,36
E ₃	50,5	1,44	8,99
E ₄	47,5	1,29	8,05
E ₅	44	1,11	6,94
E ₆	40	0,91	5,68
E ₇	37,5	0,74	4,65

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 18. Angulo de los tensores – Oeste

Angulo de los tirantes		
<i>Oeste</i>		
Nº de tirante	Ángulo	
	Paralelo	Perpendicular
#		
O ₁	33	-
O ₂	34	-
O ₃	37	-
O ₄	41	-
O ₅	44	-
O ₆	48	-
O ₇	59	-

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 19. Angulo de los tensores – Este

Tensión y carga de los tirantes		
<i>Este</i>		
Nº de tirante	Ángulo	
	Paralelo	Perpendicular
#		
O ₁	60	78

O ₂	60	77
O ₃	60	75
O ₄	60	75
O ₅	60	75
O ₆	60	70
O ₇	60	70

Fuente: Elaboración propia, 2023

Anexo A 20. Tensión de los tensores estabilizadores.

Masa aplicada Kg	Nº ensayo	Posición carga cm	Tensión			Mástil
			T _{eo}	T _{ee}	T _{es}	
			Kg/cm2			
0,55	1	12,5	45,248	162,943	18,21	0,49
	2	25	44,420	199,548	18,13	0,38
	3	50	52,537	228,149	18,00	0,40
	4	75	40,982	213,856	18,18	0,37
	5	100	92,119	217,374	18,17	0,51
	6	112,5	87,981	218,583	18,257	0,507

Fuente: Elaboración propia, 2023

ANEXO B. - FOLLETO DE CONSTRUCCION DE LOS MODELOS

El siguiente apartado tiene como finalidad proporcionar una explicación detallada del proceso constructivo de ambos modelos:

1. Estructura tenségrica

- **Encofrado**

Con el propósito de evitar fallas por vaciar en múltiples partes, se optó por realizar un único vaciado, utilizando como material láminas de policloruro de vinilo reforzado (PVC) de 4 mm. Se puede evidenciar en las siguientes figuras el material y el resultado final del encofrado antes de ser utilizado.



Anexo B 1. Encofrado de las piezas que conforman la estructura tenségrica.

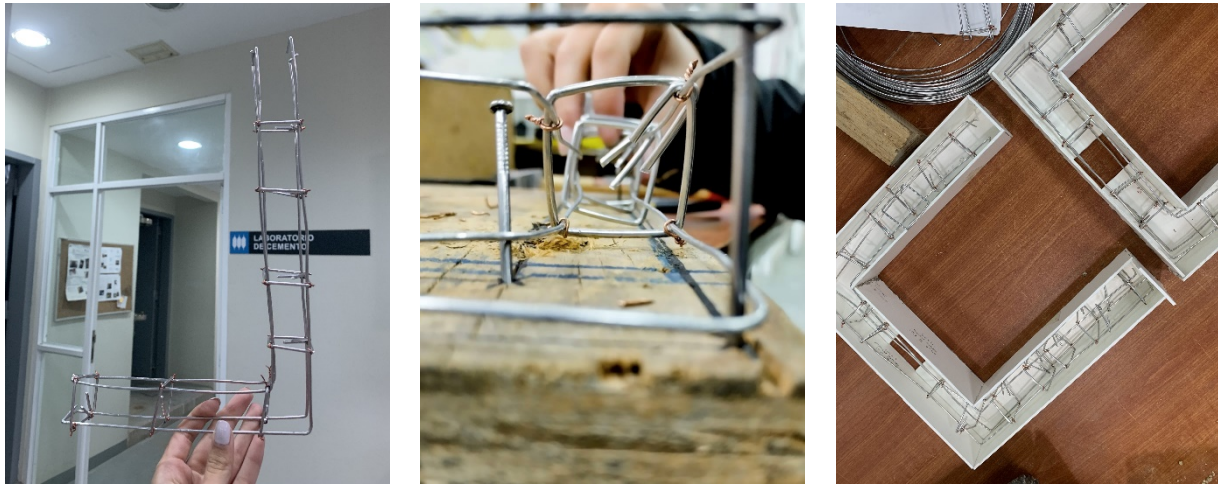
Fuente: elaboración propia, 2023

- **Mezcla**

Se utilizó un mortero compuesto por cemento, agregados finos (tamices número 30, 50 y 100) y agua. La mezcla se diseñó basándose en un método empírico, donde se realizaron pruebas de diferentes dosificaciones de cemento, arena y agua, con el propósito de generar una mezcla fluida.

- **Refuerzo**

Para simular los aceros longitudinales y transversales se empleó un alambre de acero galvanizado y se reprodujo un armado de aceros que emulara uno real.

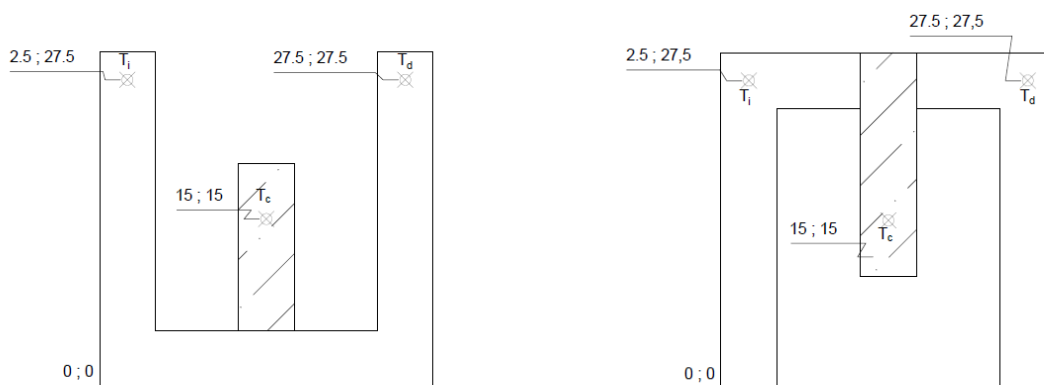


Anexo B 2. Armado de aceros de refuerzo de las piezas que conforman la estructura tensébrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

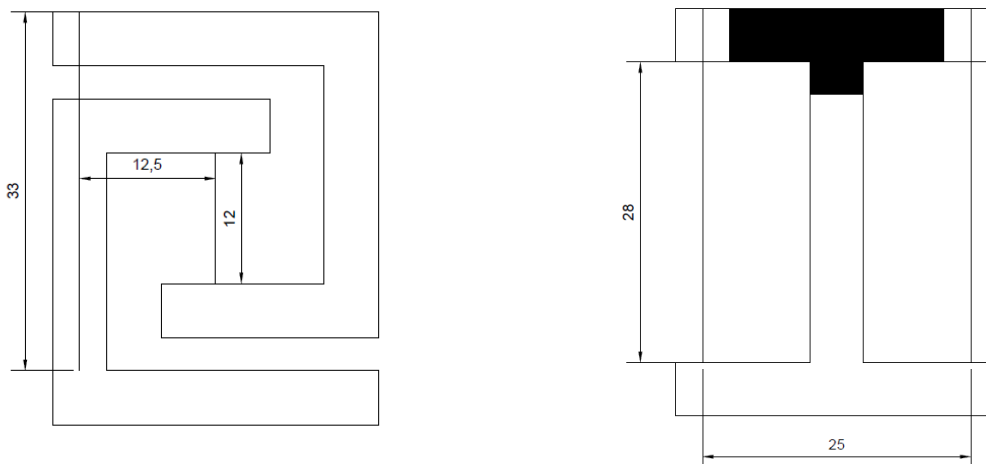
- **Tirantes**

Se emplearon 3 guayas de acero forradas de 1,7 mm de diámetro para tensar, ubicadas como se muestra en las siguientes imágenes, siguiendo la nomenclatura mostrada:



Anexo B 3. Ubicación de los tirantes en la pieza superior (izquierda) e inferior(derecha) de la estructura tensébrica.

Fuente: elaboración propia, 2023



Anexo B 4. Planos de ubicación (vista lateral y frontal) de las piezas para obtener el equilibrio de la estructura tenségrica.

Fuente: elaboración propia, 2023

2. Sistema Atirantado - Puente

- **Modelo a escala**
 - **Escala**

El modelo a escala del puente fue realizado en tres elementos principales, el tablero, mástil y posteriormente los tirantes, a continuación, se detalla la construcción de los mismos, siguiendo las dimensiones expuestas a continuación:

Anexo B 5. Dimensiones del modelo a escala del puente atirantado.

1:100				
PUENTE				
<i>Pista</i>				
Largo pista	1,25	m	125	cm
Ancho pista	0,196	m	19,6	cm
<i>Cajón</i>				
Profundidad de cajón	0,045	m	4,5	cm
Espesor de cajón	0,004	m	0,4	cm
Ancho losa superior (cajón)	0,136	m	13,6	cm
Ancho losa inferior (cajón)	0,0840385	m	8,40	cm
MÁSTIL				
Alto (vertical)	0,7	m	70	cm
Altura (inclinada)	0,8063	m	80,6	cm

<i>Base (Trapezoidal)</i>					
Base mayor	0,15	m	15	cm	
Base menor	0,04	m	4	cm	
Longitud de arco (curva)	0,153	m	15,3	cm	
Altura	0,25	m	25	cm	
Altura inclinada	0,256	m	25,6	cm	
<i>Lateral</i>					
<i>Recta 1</i>					
Altura (vertical)	0,1	m	10	cm	
Ancho (Horizontal)	0,15	m	15	cm	
<i>Recta 2</i>					
Altura (vertical)	0,2	m	20	cm	
Ancho (Horizontal)	0,1	m	10	cm	
<i>Recta 3</i>					
Altura (vertical)	0,3	m	30	cm	
Ancho (Horizontal)	0,07	m	7	cm	
<i>Posterior</i>					
<i>Curva 1</i>					
Altura (vertical)	0,1	m	10	cm	
Ancho (Horizontal)	0,058	m	5,8	cm	
<i>Curva 2</i>					
Altura (vertical)	0,2	m	20	cm	
Ancho (Horizontal)	0,04	m	4	cm	
<i>Curva 3</i>					
Altura (vertical)	0,3	m	30	cm	
Ancho (Horizontal)	0,04	m	4	cm	

Fuente: Elaboración propia, 2023

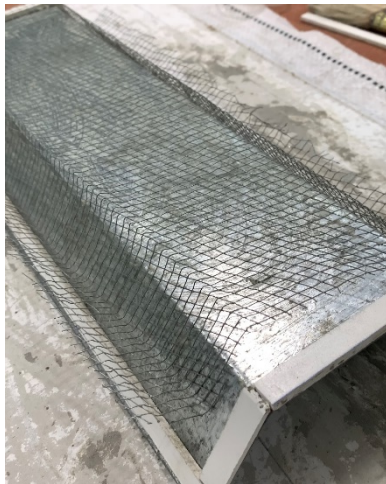
• **Tablero**

Para realizar el encofrado se utilizaron láminas de zinc, debido a que permitió la fácil manipulación del mismo con el fin de crear las formas requeridas y asegurar el espesor. Este se vació en 3 partes, en primer lugar, el cajón, posteriormente el postensado y por último la pista.



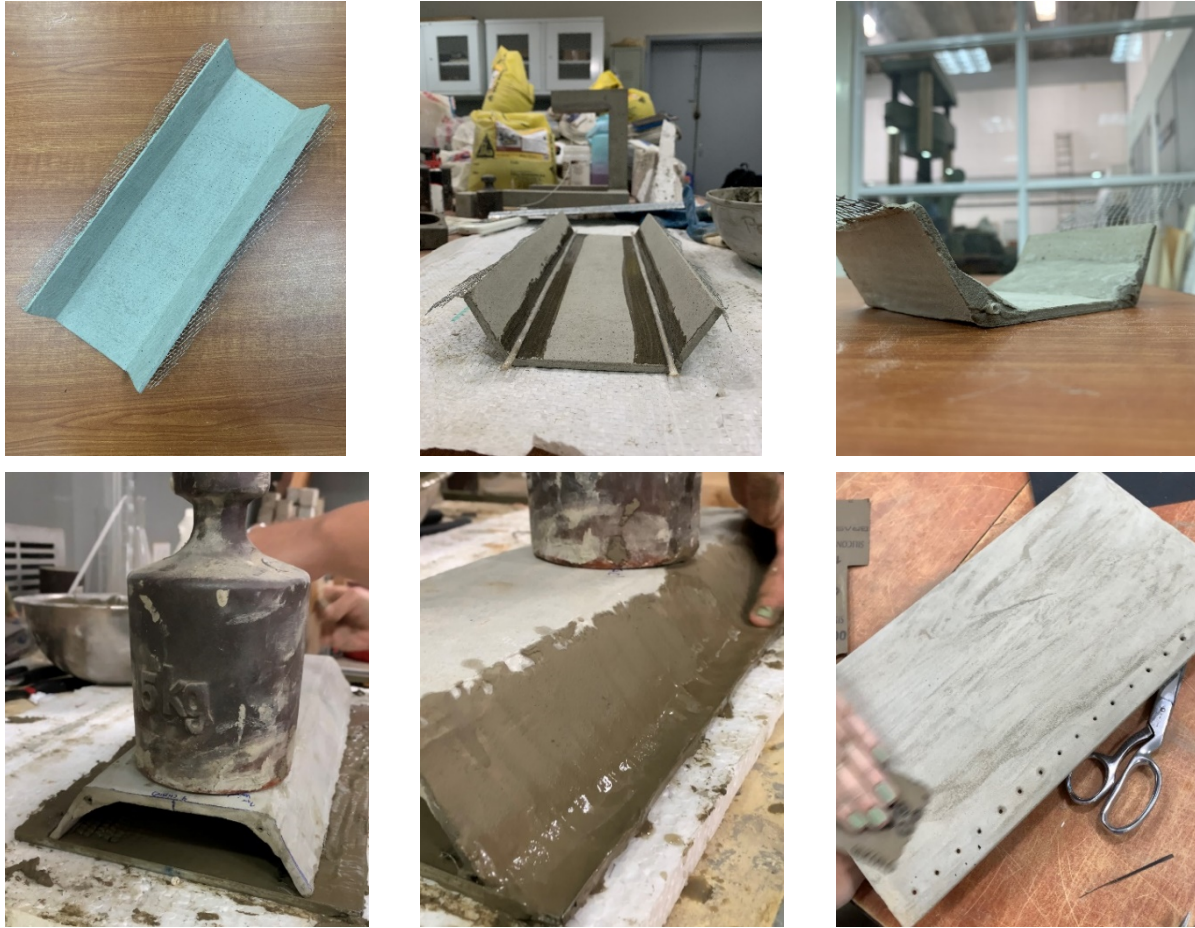
Anexo B 6. Encofrado del tablero del puente, hecho con láminas de zinc.

Fuente: elaboración propia, 2023



Anexo B 7. Proceso de vaciado del cajón del tablero del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

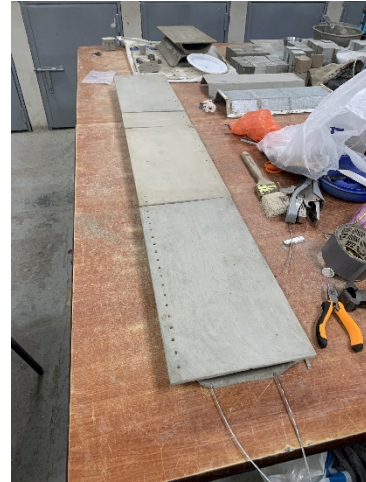


Anexo B 8. Etapas de vaciado del tablero.

Fuente: elaboración propia, 2023

Se realizó un diseño de mezcla empírico de mortero, que involucró el uso de cemento y pasante del tamiz N°200, adicionalmente con el fin de generar un refuerzo que simulara el acero longitudinal y transversal se empleó una malla electrogalvanizada C27.

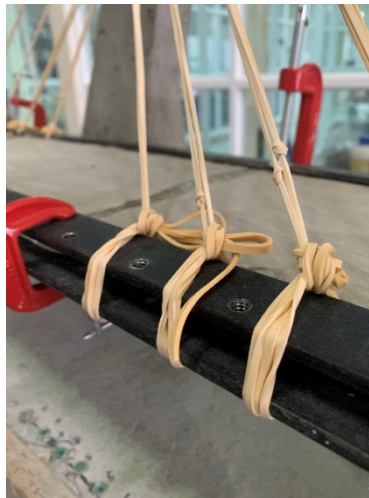
Para realizar el tablero de 125 cm de largo se emplearon 4 dovelas, 3 de ellas de 38 cm y una de 11 cm, lo que generó una pista de 125 cm, unidas luego por el sistema de postensado.



Anexo B 9. Dovelas que conforman el tablero del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

Por último, debido a la fragilidad del mortero utilizado y a la configuración del sistema se le añadieron dos elementos rigidizadores, adicionales al postensado, uno interno y otro externo conformado por dos pletinas de hierro en el extremo de los volados con la finalidad de generar una distribución uniforme de las tensiones aplicadas y evitar la torsión del tablero.



Anexo B 10. Sistema rigidizador del puente.

Fuente: elaboración propia, 2023

- **Mástil**

Debido a que el mástil requería una superficie de apoyo, para evitar volcamientos, se realizó una fundación con dimensiones de 46 cm por 56 cm con 9 cm de alto, que fue vaciada en concreto y reforzada con aceros tanto longitudinales como transversales, dejando conectores de corte (cabillas de $\frac{1}{4}$ "") para el posterior vaciado del mástil.

Por la complejidad geométrica del miembro, para el encofrado se utilizó cartón forrado con papel Contac y se reforzó con yeso y gasa con el fin de generar rigidez.



Anexo B 11. Encofrado del mástil.

Fuente: elaboración propia, 2023

En virtud de que este trabajo se centraba en la estabilidad, se diseñó la mezcla con el propósito de que tuviera una alta resistencia, para evitar una falla del miembro, debido a esto se utilizó la siguiente dosificación, utilizando mortero tipo “SikaGrout ES 101: mortero de cemento hidráulico sin retracción” y agregado fino.

Por último, debido a que se planteó, en primera instancia, usar guayas de bicicleta como tensores para el puente, estas fueron colocadas en su posición, se sujetaron al armado de cabillas interior del mástil y se vació con ellos embebidos en el elemento. Posteriormente estos fueron cortados y se utilizaron como apoyo para colocar las ligas que fungieron como tirantes.



Anexo B 12. Colocación de guayas en el vaciado del mástil.

Fuente: elaboración propia, 2023

- **Tirantes**

Con base en el diseño inicial se planteó utilizar 20 guayas de cada lado de 1.5mm y de 2 mm, debido a que este material sería el más semejante a un tirante de acero real. Sin embargo, por complicaciones al tensar las mismas de forma manual, se estableció el cambio a ligas anudadas entre sí.



Anexo B 13. Colocación de ligas como tirantes.

Fuente: elaboración propia, 2023