

# Análisis del plan de construcción del puente para tubería sobre el río Virilla del AyA



# Abstract

Professional practice run was held at the Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, the same was the analysis of the construction plan of the bridge over the river Virilla pipe. This analysis looks mainly study some important aspects from the point of view of construction and occupational safety, for it was necessary to refer to different standards, books and documents that helped create the framework for the study of the various topics, some international as, rules of the American Institute of Steel Construction, American Concrete Institute standards, standards of Occupational Safety and Health Administration. Within the national rules were consulted; Código Sísmico de Costa Rica 2010, Normas de seguridad en la construcción, Standards INTECO, among others.

Within a few goals of this analysis include: Analyze the proposed construction plan for this work, comparing the mounting proposed main structure, analyze some sections of the structure, analyze the behavior of the cable and structure during assembly and review some aspects related to security.

Finally is given to the Executive Unit of AyA a document with the results and analysis of the points studied, as well as a series of conclusions and recommendations consistent with the analyzes performed.

Keywords: construction plan, suspension bridge, construction process, construction safety.

# Resumen

La práctica profesional dirigida se realizó en el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. La misma consistió en el análisis del plan de construcción del puente para tubería sobre el río Virilla. Este análisis busca principalmente estudiar aspectos importantes desde el punto de vista constructivo y de seguridad ocupacional. Para el mismo fue necesario hacer referencia a diferentes normativas, libro y documentos que ayudaron a crear el marco de estudio de los diferentes temas, algunos de ellos internacionales como; normas del American Institute of Steel Construction, normas del American Concrete Institute, normas del Occupational Safety and Health Administration. Dentro de la normativa nacional se consultó; Código Sísmico de Costa Rica 2010, Normas de Seguridad en la Construcción, Normas de INTECO, entre otras.

Dentro de los objetivos de este análisis se pueden mencionar: Analizar el plan de construcción propuesto para esta obra, comparar las propuestas de montaje de la estructura principal, estudiar los elementos utilizados como arriostre de las torres del puente, así como la transición entre torre y cable principal planteada en la obra, investigar el comportamiento del cable y estructura durante el montaje y revisar algunos aspectos relacionados con la seguridad, desde el punto de vista de aplicación de mecanismos que protejan la integridad de los trabajadores durante la obra.

Finalmente se le entrega a la Unidad Ejecutora del AyA un documento con los resultados y análisis de los puntos estudiados, así como una serie de conclusiones y recomendaciones acordes con los análisis realizados.

Palabras claves: Diseño de sitio, Montaje de puente colgante, comportamiento del cable en montaje de puente colgante, Miembros conectados por pasadores, matriz de riesgos.

# **Análisis del plan de construcción del puente para tubería sobre el río Virilla del AyA**

# **Análisis del plan de construcción del puente para tubería sobre el río Virilla del AyA**

JOSSER FERNANDO DE LA O ARIAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción .....	4
Marco teórico .....	5
Metodología .....	17
Resultados .....	27
Análisis de los resultados .....	46
Conclusiones .....	64
Recomendaciones.....	67
Apéndices .....	71
Anexos.....	71
Referencias.....	72



# Prefacio

La elaboración del presente trabajo nace ante la necesidad del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por tener un panorama claro para la construcción del puente para tubería de agua potable ubicado en la ruta 147 a la altura del río Virilla. Esta obra se compone de un puente tipo colgante con una luz de 137 metros, las torres ubicadas a ambos lados del cañón tendrán una altura de 9 metros de estas se anclaran seis cables de 38 milímetros de diámetro a los cuales se le colocaran las péndolas encargadas de sostener una estructura tipo cercha que llevará un tubo de acero de 900 milímetros de diámetro encargado de transportar el agua potable.

Este proyecto es novedoso para la unidad ejecutora de proyectos de esta institución, ya que no presentan antecedentes en la construcción de puentes con grandes luces es por esta razón que es necesario tener claridad en todos los aspectos que envuelven la obra, tanto en el diseño como en la construcción. Además este traerá consigo una mejora importante en el abastecimiento de agua del sector oeste de San José lo que significa un impacto social y económico importante para el desarrollo de esta parte de la capital.

Con este proyecto se pretende proveer un análisis más conciso en lo referente a la parte constructiva de la obra, estudiando aquellos aspectos que requieran un mayor cuidado y planificación para lograr una convergencia entre lo diseñado y lo que se va construir en campo. Además tomando en cuenta la ubicación del sitio y las condiciones topográficas es necesario tener claro los procesos de constructivos, esto con el fin de disminuir los factores que puedan perjudicar la obra.

El análisis busca aclarar aquellas situaciones que no se comprenden en los planos constructivos y que muchas veces se dejan de lado lo que provoca la confusión de los operarios lo que conlleva a atrasos en las obra.

Se espera diseñar un flujo constructivo que pretende agilizar los trabajos tratando de disminuir los tiempos muertos considerando además la seguridad de los trabajadores. Por otro lado es importante la buena planificación de la obra para que la construcción de la misma tenga el menor impacto posible en las personas ajenas a la construcción, esto porque el sitio se ubica en una de las principales rutas que comunican a San José con Alajuela, por estos factores el trabajo a desarrollar cobra importancia desde el punto de vista constructivo, de planificación y de seguridad en la obra.

El objetivo de este trabajo consiste en el análisis del plan construcción del puente para tubería sobre el río Virilla del AyA, en este caso se estudiará el documento: "Procesos constructivos y montaje de puente sobre río Virilla" el cual consiste en una explicación de la construcción de la obra por parte de la empresa encargada del montaje del puente. Se analizarán algunos puntos en los que existe inconformidad por parte del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, luego de esto se realizarán observaciones y/o sugerencias que ayuden a aclarar algunos temas de dicho documento.

Agradezco primeramente a Dios por darme las herramientas necesarias para lograr concluir mis estudios. Además a mi familia por darme su apoyo, a mis padres por la educación brindada y la formación que me han dado a lo largo de mi vida, a mis hermanos por ser un ejemplo de dedicación y constancia. Finalmente agradezco al Ingeniero José Bolaños Warner por su apoyo durante este proyecto y la disponibilidad de tiempo brindada, además al Ingeniero Gustavo Rojas Moya por su función de profesor tutor dando recomendaciones oportunas y observaciones necesarias para lograr un análisis adecuado de los objetivos planteados en este proyecto.

# Resumen ejecutivo

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados tiene como meta el suministro de agua con calidad potable, en cantidad, continuidad y a un costo razonable que permita la sostenibilidad de los sistemas operados. Por consiguiente el proyecto de abastecimiento de agua potable para la zona oeste de San José tiene como objetivo principal mejorar las condiciones de abastecimiento de agua potable para esta zona del Área Metropolitana, para ello se implementará la perforación de nuevos pozos, mejoras en el almacenamiento y de las líneas principales de conducción y distribución.

Este proyecto beneficiará a unas 244000 personas actualmente sin embargo se proyecta que en unos 20 años se abastecerá a unas 320 950 personas. Dicho proyecto tiene un costo de \$ 13.153.260 y el AyA adjudicó su construcción a la empresa constructora Fernández Vaglio Constructora S.A.

Uno de los principales componentes de este proyecto radica en la sección de la línea de conducción que pasa sobre el río Virilla, este se ubica en la ruta 147 en la Radial Santa Ana-San Rafael de Alajuela. El paso de la tubería se realizará mediante la construcción de un puente colgante con una luz de 137 metros que atravesará el cañón del río, la estructura constará de dos torres de 9 metros de altura entre ellas se colocarán seis cables de 38 mm de diámetro que servirán para posicionar una serie de péndolas encargadas de sujetar una estructura tipo cercha que se encargará de sostener un tubo de 900 mm de diámetro por donde circulará el agua potable.

Con el fin de tener mayor claridad en las obras a ejecutar, Acueductos y Alcantarillados solicitó a la empresa constructora un documento donde se expliquen los principales procesos constructivos y sistemas de seguridad que se

implementaran durante la construcción de la obra.

Como consecuencia a esta petición la empresa Fernández Vaglio Constructora S.A genera un documento llamado: "Proceso constructivo y montaje de puente sobre el río Virilla".

El presente documento tiene como objetivo principal analizar el plan de construcción del proyecto "Puente sobre el río Virilla" propuesto por la empresa Fernández Vaglio, considerando las técnicas de ejecución, procedimientos de montaje, factores de riesgo y planificación. Para esto se realizó un estudio de los principales temas abordados en el documento elaborado por la empresa constructora. Además de este objetivo principal se plantean una serie de objetivos específicos con el fin de tener un panorama claro del análisis, los objetivos específicos planteados son:

- Elaborar una propuesta de diseño de sitio que ayude a facilitar el flujo de actividades en la construcción, considerando las limitaciones geométricas presentes en el sitio.
- Realizar un análisis comparativo entre la propuesta inicial para el montaje del puente utilizando grúas tipo camión y la propuesta del montaje utilizando un sistema de cables secundarios con una grúa tipo teleférico.
- Analizar desde el punto de vista de factibilidad constructiva y de eficiencia mecánica, el tramo lateral del puente (unión entre anclaje activo y torre).
- Analizar la condición del nudo de transición entre elementos rígidos (anclaje-torre) y elementos principales (torre a torre), considerando la parte constructiva y eficiencia de la misma.



- Determinar la flecha que debe tener el cable, antes, durante y después del montaje de la estructura del puente.
- Analizar las propuestas existentes para realizar el montaje de las cerchas del puente, ya sea iniciando en uno de los extremos o iniciar del centro a los bordes.
- Analizar el plan de seguridad planteado por la empresa constructora.
- Estudiar el caso particular de la familia que vive debajo del puente y proponer estrategias que velen por su seguridad mientras se realiza la obra.

Debido a la amplitud de aspectos que comprendió este análisis, se consultaron diferentes temas relacionados con los objetivos planteados tales como: Izaje de cargas, miembros conectados por pasadores, soldadura, miembros en tensión, longitud de desarrollo, análisis no lineal, seguridad en la construcción, etc. Por consiguiente fue necesario consultar libros y documentos relacionados con estos temas, además se consultaron normas nacionales e internacionales como: American Institute of Steel Construction, American Concrete Institute, Occupational Safety and Health Administration, Código Sísmico de Costa Rica 2010, Normas de Seguridad en la Construcción, Normas de INTECO, entre otras. Las cuales fueron fundamentales para tener los lineamientos básicos de los análisis presentados. Además de esto fue necesaria la utilización de algunos programas de cómputo relacionados con el análisis estructural y la creación de modelos en 3D.

Posterior al estudio de los objetivos mencionados anteriormente se obtuvieron una serie de recomendaciones que pretenden mejorar el documento creado por la empresa constructora. En el caso del diseño de sitio se elaboró una propuesta ya que no se contaba con ninguna, el mismo se realizó con la finalidad de adaptarlo a las necesidades propias del sitio de trabajo.

Para la comparación de métodos de montaje se establecieron puntos de evaluación que ayudaron a definir la mejor opción para la obra dando como resultado la sugerencia de utilizar el sistema de cables secundarios y "grúa teleférico" para el montaje.

En lo que respecta al análisis del anclaje de las torres del puente fue necesario abordar el tema desde la perspectiva constructiva, de diseño y

revisión de la capacidad estructural, dando como resultado la sugerencia de su proceso constructivo ya que este no lo presentaba de igual manera se diseñaron algunas de las uniones y se corroboró que los elementos propuestos cumplieran con los estados limite.

En relación con el sistema utilizado para realizar la transición entre torre y cable principal se analizó la capacidad de los elementos propuestos encontrándose que uno de estos incumplía con las dimensiones mínimas de las normas AISC, de igual manera se revisó los estados limite del elemento.

El estudio del comportamiento del cable es necesario para tener una referencia de su comportamiento ante diferentes estados de carga. Por medio de la utilización del programa SAP 2000 V14, se logró determinar el aumento de la flecha partiendo desde su posición inicial hasta la posición final. Con la ayuda de este programa además se logro analizar las propuestas de montaje de la estructura definiendo dos puntos de comparación uno que planteaba comenzar el montaje del centro a los extremos y otra desde los extremos al centro, se determinó que la primera opción genera menores deformaciones en el cable lo que facilita el montaje de la estructura.

Por último en el tema de la seguridad en construcción se encontraron debilidades en los planteamientos realizados, así como falta de análisis en algunos temas. Por esta razón se realizaron las recomendaciones respectivas y se planteo una matriz de riesgos para el proyecto específico. Además se determinó que en la parte de planificación de la obra se debe incluir el tema de la familia que vive debajo del puente.

Es importante mencionar que los objetivos planteados para este proyecto fueron alcanzados, según lo definido en el alcance, ya que este no pretendía la elaboración de un nuevo plan de construcción para la obra sino mas bien buscaba el análisis del documento existente con el fin de generar observaciones que le servirían a la unidad ejecutora de Acueductos y Alcantarillados para realizar las recomendaciones respectivas a la empresa constructora con el fin de que esta las tomará en cuenta para la elaboración del documento definitivo previo al comienzo de la obra.

# Introducción

La convergencia entre el diseño y la construcción es tema clave para lograr el desarrollo adecuado y eficiente de cualquier proyecto, por esta razón es necesario que antes de su inicio exista una planificación que ayude a contemplar los aspectos que puedan provocar inconvenientes durante la ejecución, que finalmente se traducen en atrasos e improvisación de técnicas que pueden resultar peligrosas.

Como un esfuerzo para lograr una mejor planificación de la obra se desarrollará el análisis del plan de construcción del puente para tubería del río Virilla, el mismo tiene como finalidad estudiar algunos aspectos constructivos y de seguridad ocupacional. Con esto se busca reducir tanto la incidencia de errores constructivos como de accidentes laborales que se puedan provocar durante la construcción.

Para el presente análisis, debido a la amplitud de aspectos que toca, se consultaron diferentes temas relacionados con los objetivos planteados tales como: Izaje de cargas, miembros conectados por pasadores, soldadura, miembros en tensión, longitud de desarrollo, análisis no lineal, seguridad en la construcción, etc. Por consiguiente fue necesario consultar libros y documentos relacionados con estos temas, además se consultaron normas nacionales e internacionales como: American Institute of Steel Construction, American Concrete Institute, Occupational Safety and Health Administration, Código Sísmico de Costa Rica 2010, Normas de Seguridad en la Construcción, Normas de INTECO, entre otras. Las cuales fueron fundamentales para tener los lineamientos básicos de los análisis presentados.

## Objetivo general

Analizar el plan de construcción del proyecto “Puente sobre el río Virilla” propuesto por la empresa Fernández Vaglio Constructora.

Considerando las técnicas de ejecución, procedimientos de montaje, factores de riesgo y planificación.

## Objetivos específicos

- Elaborar una propuesta de diseño de sitio que ayude a facilitar el flujo de actividades en la construcción, considerando las limitaciones geométricas presentes en el sitio.
- Realizar un análisis comparativo entre la propuesta inicial para el montaje del puente utilizando grúas tipo camión y la propuesta del montaje utilizando un sistema de cables secundarios con una grúa tipo teleférico.
- Analizar desde el punto de vista de factibilidad constructiva y de eficiencia mecánica, el tramo lateral del puente (unión entre anclaje activo y torre).
- Analizar la condición del nudo de transición entre elementos rígidos (anclaje-torre) y elementos principales (torre a torre), considerando la parte constructiva y eficiencia de la misma.
- Determinar la flecha que debe tener el cable, antes, durante y después del montaje de la estructura del puente.
- Analizar las propuestas existentes para realizar el montaje de las cerchas del puente, ya sea iniciando en uno de los extremos o iniciar del centro a los bordes.
- Analizar el plan de seguridad planteado por la empresa constructora.
- Estudiar el caso particular de la familia que vive debajo del puente y proponer estrategias que velen por su seguridad mientras se realiza la obra.

# Marco Teórico

Es importante recalcar que por la gran cantidad de tareas que componen un proyecto constructivo, es imposible delimitar el análisis dentro de un solo marco teórico, por lo que es necesario basarnos en diferentes teorías según lo requiera el problema en estudio. Por esta razón el marco teórico de este proyecto no se centra únicamente en el desarrollo de un tema, sino más bien trata de contemplar el abanico de temas necesarios para lograr alcanzar los objetivos propuestos, por esta razón el marco teórico se compone de temas relacionados con: aspectos constructivos, análisis de elementos estructurales, diseño de sitio y seguridad en la construcción.

## Aspectos constructivos

### Puentes colgantes

Antes de iniciar el estudio de cualquier obra, es necesario conocer sus componentes principales para entender su funcionamiento dentro del sistema, además, de esta forma se crea un panorama más claro de los elementos que se deben construir, lo que facilita una percepción global de la obra.

Un puente colgante está constituido por dos o más cables o grupos de cables que pasan sobre dos torres y se aseguran en sus extremos a dos bloques de anclajes.<sup>1</sup> Para el diseño de este tipo de estructuras es importante contar con algunos datos generales como; luz entre centros de torres, luz libre entre estribos, altura de las torres, flecha del puente y longitud entre las torres y los bloques de anclajes.

---

<sup>1</sup> Quiroga, Puentes Colgantes

Estos puentes son generalmente utilizados cuando es necesario salvar grandes luces, por lo que generalmente su tablero es metálico. El puente colgante es, igual que el arco, una estructura que resiste gracias a su forma; en este caso salva una determinada luz mediante un mecanismo resistente que funciona exclusivamente a tracción, evitando, gracias a su flexibilidad, que aparezcan flexiones en él.<sup>2</sup> Los elementos principales de este tipo de puente son el cable principal, las torres y el tablero.

### El cable

Es un elemento que no posee rigidez por lo que no resiste flexiones. En el caso de que se le aplicase un sistema de fuerzas, este tomará la forma necesaria para que en él solo se produzcan esfuerzos axiales en tracción. Debido a esto, la forma del cable coincidirá con la línea generada por la trayectoria de la composición de fuerzas que actúan sobre él.

La geometría que adquiere el cable es una combinación, porque el peso propio del cable genera una catenaria, mientras que la carga del tablero la hace tender a una parábola, sin embargo, la diferencia entre ambas geometrías es mínima y por esta razón en el caso de análisis se utiliza una parábola de segundo grado.

### Las torres

Estas son los elementos encargados de sostener los cables en su posición, sobre ellas actúan principalmente fuerzas de compresión, las cuales son aplicadas casi verticales y hacia abajo y son estabilizadas por los cables principales. El concreto es un material óptimo, ya que tiene un

---

<sup>2</sup> <http://puentes.galeon.com/tipos/pontscolgantes.htm>

comportamiento adecuado ante la compresión, sin embargo debe tenerse en cuenta que existen muchos factores que influyen en la elección del material de las torres, por ejemplo: las condiciones del suelo, la rapidez del montaje, la estabilidad durante su construcción, etc. Por consiguiente, esta elección no se debe basar totalmente en un cálculo estimativo de costes basado en la cantidad.<sup>3</sup>

Las torres de los puentes metálicos se montan generalmente mediante grúas trepadoras ancladas a ellas, que se van elevando a la vez que van subiendo las torres o se izan las torres ya armadas en su totalidad mediante la utilización de una grúa. Las de los puentes de hormigón se construyen mediante encofrados trepadores o mediante encofrados deslizantes.

## El tablero

Este es la estructura que se encuentra suspendida por medio de péndolas que la conectan con el cable principal. En el caso de un puente vehicular cumple la función de brindar una superficie de ruedo al igual que en puente peatonal se encarga de servir de plataforma para que las personas caminen. En puentes utilizados para el paso de tuberías, esta estructura sirve como soporte para llevar la tubería.

Existen dos maneras de realizar el montaje del tablero, en la primera se va montando por voladizos sucesivos, en donde se va avanzando de péndola en péndola donde se cuelga. En este caso el avance es simétrico desde la torre hacia el centro del claro, además el montaje se realiza a ambos lados cerrando en el centro. Por otro lado, tenemos un montaje que consiste en llevar el tablero en secciones que luego son elevadas mediante un cabrestante, el cual una vez situado en la posición definitiva se cuelga la sección de la péndola. En este caso el montaje es inverso al anterior puesto que las secciones se comienzan a montar desde el centro del claro hacia las torres.

## Montaje de puentes Colgantes

El montaje de este tipo de estructuras resulta ser más sencillo que el de otro tipo de puentes. Existen diferentes procedimientos para su montaje y estos son elegidos de acuerdo con las necesidades propias del sitio donde se construirán. El tipo más común consiste en hacer los estribos, las pilas intermedias, los anclajes y los pórticos, luego se sigue el siguiente esquema de montaje:

- a) Se pasan mediante embarcaciones o cualquier otro sistema de cables de servicio de una orilla a otra. Estos cables unidos a los soportes pueden ser ligeros, puesto que únicamente deben soportar las piezas de la obra para el montaje (cables definitivos, péndolas, elementos del tablero).
- b) Luego un carretón de vaivén (tipo grúa) colgado de poleas que ruedan sobre los cables de servicio y movido por un sistema adecuado de cabrestante, permite poner primero los cables definitivos y luego, mediante pescantes, las péndolas y el tablero.

Un factor muy importante a tomar en cuenta es la colocación de los cables principales, ya que deben tener tal longitud que, teniendo en cuenta su alargamiento por efecto de su peso propio y por las cargas que tendrán que soportar, presente una vez terminada la obra, la flecha prevista en el proyecto.<sup>4</sup>

En la figura siguiente se muestra un esquema clásico de montaje de puentes en donde los tramos se hacen avanzar simétricamente, partiendo desde centro hacia los estribos, esto con el fin de evitar deformaciones excesivas en los cables principales.

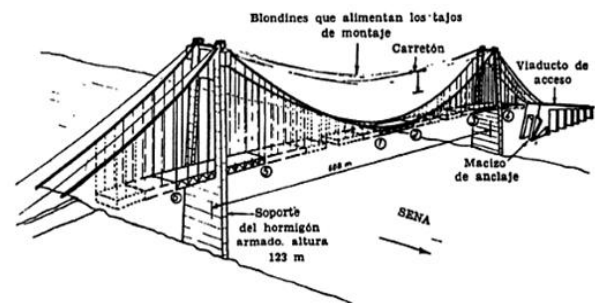


Figura 1. Esquema montaje de un puente (P. Galabru).

<sup>3</sup> ITEA, Sistemas Estructurales: Puentes

<sup>4</sup> P Galabru, Tratados de procedimientos Generales de construcción: Obras de fábrica y metálicas.

## Consideraciones relacionadas con el montaje

La elaboración de proyectos que involucre el empleo de cables estructurales, sobre todo para puentes colgantes, requiere tomar en cuenta los efectos no lineales introducidos por los grandes desplazamientos que se producen en este tipo de estructuras.<sup>5</sup>

Se debe tener en cuenta los grandes desplazamientos mencionados, para realizar un análisis de la flecha del puente, debido a que esta cambia durante las diferentes etapas de la construcción, ya que primeramente estará sometida únicamente al efecto provocado por el peso propio del cable y luego cambiará al momento en que se realice el montaje del tablero y finalmente tendrá que adoptar la flecha definitiva cuando se ponga en servicio. Es decir, para la planificación del montaje del puente colgante es necesario realizar un análisis de la flecha en los tres estados antes mencionados.

Debido al efecto cambiante de la flecha durante las diferentes etapas constructivas se debe poner atención a las deformaciones provocadas por este comportamiento, puesto que la estructura que está sujeta del cable principal también sufrirá los efectos producidos por el cambio de flecha, lo que puede provocar que los elementos se vean sujetos a fuerzas para los cuales no fueron diseñados. En algunos casos, este problema se soluciona considerando una contraflecha en la estructura que ayude a solventar los desplazamientos provocados por la variación de la flecha y en otros casos, el diseñador prevee este efecto y lo soluciona creando una estructura lo suficientemente rígida, capaz de resistir los esfuerzos provocados por el cambio de la flecha.

## Análisis no lineal

Hasta hace un tiempo atrás la mayoría de análisis hechos en la ingeniería se realizaban por medio de un método lineal, el cual proporciona una aproximación aceptable de las características reales de los problemas analizados. Anteriormente, aunque se conocía de la

---

<sup>5</sup> Ampuero John, Aspectos estructurales en el montaje de puentes colgantes.

existencia del análisis no lineal, este era poco utilizado debido a la complejidad de la formulación de los problemas y a la cantidad de cálculos que se debían realizar para llegar a su solución, sin embargo, actualmente, con el mejoramiento de las computadoras y la creación de nuevos programas se ha facilitado en gran medida la implementación de este tipo de análisis.

La diferencia fundamental entre un análisis lineal y otro no lineal se basa en la rigidez, la cual puede ser afectada por factores como: la forma, el material y el soporte de la pieza. Esto se puede afirmar porque cuando una estructura se deforma bajo una carga, la rigidez cambia y si el cambio es suficientemente pequeño es lógico asumir que las propiedades de forma del material cambiarán durante la deformación. Este es el principio fundamental del análisis lineal, su modelo a analizar mantiene la rigidez que poseía el elemento en su forma no deformada. Mientras que el análisis no lineal asume que la rigidez cambia durante el proceso de deformación y la matriz de rigidez  $[K]$  debe actualizarse, ya que el solucionador no lineal progresa a través de un proceso de solución iterativa.<sup>6</sup>

Existen tres factores que provocan la no linealidad de un análisis, en algunos casos estos factores afectan el estudio de forma individual, sin embargo, en otros casos la no linealidad del análisis se debe a más de un factor. Dentro de los tres casos que producen este efecto tenemos<sup>7</sup>:

- a) Geometría no lineal: si los cambios de rigidez provienen únicamente de los cambios de forma, el comportamiento lineal se define como no linealidad geométrica. Además se debe tomar en cuenta que cuando existen grandes deformaciones, la dirección de la carga puede cambiar a medida que se deforma la pieza, lo que genera un nuevo caso de estudio no lineal.
- b) Material no lineal: si los cambios de rigidez ocurren únicamente a causa de cambios en las propiedades del material bajo condiciones operativas, el problema es la no linealidad del material. Por otro lado si las cargas son suficientemente elevadas para provocar deformaciones permanentes o si las

---

<sup>6,7</sup> Solidworks, Comprensión del análisis no lineal

deformaciones unitarias son muy elevadas, debe utilizarse el modelo de material no lineal

c) Pérdida de estabilidad elástica (pandeo): La rigidez de una pieza también cambia a causa de las cargas aplicadas. A veces las cargas, dependiendo cómo se apliquen, pueden aumentar la rigidez o reducirla.

## Izaje de cargas mediante grúa

El izaje de cargas consiste en la elevación de un elemento por medios mecánicos a través de la utilización de maquinaria. Una de las máquinas más utilizadas para esta tarea son las grúas, esto debido a su facilidad de transporte y versatilidad para realizar diferentes maniobras de trabajo.

Las grúas tipo camión o grúas montadas sobre camión, están provistas de un equipo hidráulico colocado en un camión transportador específicamente diseñado y fabricado para el traslado de la unidad como los estabilizadores, contrapeso, entre otros. Las grúas montadas sobre camión tienen una capacidad que oscila entre 18 y 500 toneladas.<sup>8</sup>

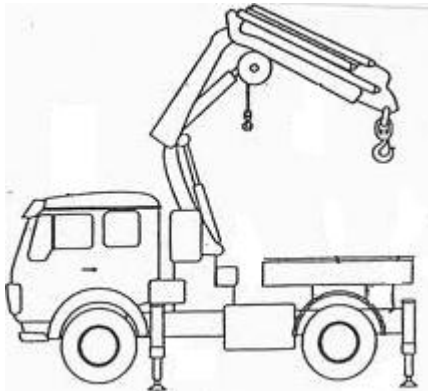


Figura 2. Esquema de una grúa tipo camión. (Dumper grúa, S.L.)

Este tipo de grúas debe manejarse con cuidado, ya que están expuestas a muchos factores que pueden provocar un accidente, entre ellos están: el vuelco del vehículo, la caída de la carga, los golpes contra objetos o personas, los atrapamientos, los contactos eléctricos indirectos, etc.

## Planificación del trabajo

<sup>8</sup> IMCA, directrices para operaciones de izaje.

El plan de trabajo es una herramienta utilizada para disminuir la probabilidad de un accidente. En él se deben considerar todos los riesgos existentes en el área de trabajo y además la capacidad real de la máquina a utilizar. Una buena planificación de trabajo siempre evitará limitaciones operacionales.<sup>9</sup>

Para una buena planificación es necesario tener en cuenta algunos factores importantes, tales como:

- Superficie de apoyo adecuada: la superficie ubicada por debajo de los apoyos de la grúa debe estar nivelada y tener la suficiente capacidad para soportar, tanto la máquina como la carga. En caso de que la superficie no cuente con estos requerimientos será necesario el mejoramiento del terreno o la utilización de plataformas, las tablas del fabricante indican cómo debe estar nivelada la grúa.
- Cuadrantes de operación: son aquellas áreas en las cuales la grúa maniobra para cargar y descargar, respecto a su posición (adelante, atrás, lado izquierda y lado derecha). Este cuadrante se debe verificar ya que varía según el tipo y modelo de la grúa.
- Tabla de carga: es el documento utilizado para calcular la capacidad real de la grúa. Es muy importante que el operador sepa interpretar esta información, ya que con ella se asegura que el izaje se realiza con seguridad y se evita que la máquina se incline o vuelque.
- Radio de operación: es la distancia horizontal desde el eje de rotación, antes de alzar la carga hasta el centro de la línea de levantamiento o el aparejo de levantamiento, después de elevar la carga.

## Plan de izaje de cargas

Un plan de izaje de ingeniería, deberá poner en relieve toda inquietud a ser abordada durante el procedimiento de instalación del proyecto<sup>10</sup>, esto asegura que las maniobras que se deben realizar serán de manera segura, ya que se pretende contemplar factores como: capacidad bruta de la grúa, tipo de eslingas y posición de las mismas,

<sup>9, 10</sup> IMCA, directrices para operaciones de izaje.

posicionamiento de los estabilizadores de la grúa, capacitación del operador y la cuadrilla, posible efecto del viento en la carga, diagrama de izaje donde indiquen los movimiento de carga y descarga, peligrosidad eléctrica, etc.

Para el plan de izaje de cargas es muy importante definir el tipo de aparejos a utilizar, un aparejo es el dispositivo empleado para asegurar una carga a un dispositivo de izaje. Existen dos tipos de aparejos:

**Eslingas:** son cables, cadenas, telas sintéticas y mallas metálicas elaboradas con o sin accesorios, para manejar cargas.

**Accesorios:** son todos los dispositivos utilizados en conjunto con las eslingas, entre ellos están; grilletes, argollas, ganchos, tensores, barras y marcos separadores.

En el caso de estos dispositivos, generalmente existen proveedores que brindan tablas con las capacidades y especificaciones de cada uno, además, indican la disposición más adecuada dependiendo de la forma de la carga y brindan algunas recomendaciones para la colocación de los mismos.

## Análisis de elementos estructurales

En cualquier obra civil que se construya es fundamental la utilización de elementos tanto de acero como de concreto, sin embargo, la teoría para el análisis y diseño de ambos elementos es diferente. Por esta razón es necesario tener claro la teoría que se debe emplear dependiendo del tipo de material estudiado.

### Elementos referentes a teoría de acero

Para el estudio del objetivo del análisis del arriostre del puente, así como de la transición entre torres y cables. Es necesario referirse a la teoría de acero con el fin de determinar las capacidades estructurales de los mismos.

#### Miembros en tensión

Son aquellos elementos estructurales que se encuentran sometidos a fuerzas axiales de tensión, generalmente son utilizados en miembros de armaduras, cables en puentes colgantes y atirantados, arriostramientos para edificios y puentes y cables de sistemas de techos colgantes. Puede usarse cualquier configuración de sección transversal, ya que independientemente del material, el único factor que determina la resistencia es el área transversal.<sup>11</sup>

Un miembro dúctil de acero, sin agujeros y sometido a una carga de tensión, puede resistir, sin fracturarse, una carga mayor que la correspondiente al producto del área de su sección transversal y del esfuerzo de fluencia del acero, gracias al endurecimiento por deformación. Si tenemos un miembro a tensión con agujeros para tornillos, éste puede fallar por fractura de la sección neta que pasa por los agujeros; esta carga de falla puede ser más pequeña que la carga requerida para plastificar la sección bruta alejada de los agujeros.<sup>12</sup>

### Resistencia de diseño

La falla en un miembro sometido a tensión se da al alcanzarse uno de los estados límites: deformación excesiva o fractura. Existen maneras de prevenir que un miembro alcance cualquiera de los estados antes mencionados. En el caso de la deformación excesiva, esta es iniciada por la fluencia, la carga sobre la acción total debe ser suficientemente pequeña para que el esfuerzo sobre la sección total sea menor que el esfuerzo de fluencia  $F_y$ . En el caso de la fractura, el esfuerzo sobre la sección neta debe ser menor que la resistencia por tensión  $F_u$ .<sup>13</sup>

En el caso del diseño o revisión de este tipo de elementos debe buscarse que exista el cumplimiento de resistencia ante la fluencia y la fractura. Para ello se aplica un factor de resistencia a la resistencia nominal y el resultado

---

<sup>11, 13</sup> T. Seguí, Diseño de estructuras de acero con LRFD.

<sup>12</sup> Catarina, Introducción al diseño de elementos sujetos a tensión.

de esto debe ser mayor que la resistencia última axial, esto se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$P_u \leq 0,9 * F_y * A_g \quad (\text{ecuación 1})$$

$$P_u \leq 0,75 * F_u * A_e \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde  $\Phi_t = 0,9$  representa el factor de resistencia por fluencia y  $\Phi_t = 0,75$  el factor de resistencia por fractura. Y  $A_g =$  área bruta, área total de la sección transversal sin deducir los huecos y  $A_e =$  área neta efectiva, esta considera adecuadamente el área reducida y corregida debido a la presencia y alternancia de agujeros que resiste la tensión.

## Miembros conectados por pasadores

Cuando un miembro va a ser conectado por un pasador, se perfora un agujero en el miembro y en las partes a las que este va a estar conectado y se inserta un pasador a través del agujero. Esto proporciona una conexión tan libre de momento como es posible en la práctica.<sup>14</sup> La información referente a este tipo de elementos la podemos encontrar en la sección D5 del AISC, en esta sección se analiza el miembro desde dos puntos diferentes los cuales son: la resistencia a la tracción y los requerimientos dimensionales del elemento.

El AISC especifica que la resistencia de diseño en tracción ( $\Phi_t P_n$ ) y la resistencia admisible en tracción, ( $P_n / \Omega_t$ ) de miembros conectados por pasadores, debe ser el menor valor determinado de acuerdo a los estados límite de rotura en tracción, rotura en corte, aplastamiento y fluencia.<sup>15</sup>

Dentro de los requerimientos dimensionales mencionados en el AISC, los cuales deben cumplir los miembros conectados por pasadores están:

- La perforación del pasador debe estar localizada a media distancia entre los bordes del miembro en la dirección normal a la fuerza aplicada. Cuando se espera que el pasador permita el movimiento relativo entre las partes

<sup>14</sup> T. Seguí, Diseño de estructuras de acero con LRFD.

<sup>15</sup> AISC, Especificaciones y Comentarios

conectadas bajo máxima carga, el diámetro de la perforación del pasador no debe ser 1mm más grande que el diámetro del pasador.

- El ancho de la placa donde se encuentra la perforación del pasador no debe ser menor que  $2b_{eff} + d$ . La mínima extensión, "a", más allá del extremo sometido a aplastamiento de la perforación del pasador, paralelo al eje del miembro, no debe ser menor que  $1,33 * b_{eff}$ .
- Las esquinas más allá de la perforación del pasador están permitidas para ser cortadas en  $45^\circ$  al eje del miembro, siempre que el área neta más allá de la perforación del pasador, en un plano perpendicular al corte, no sea menor que la requerida más allá de la perforación del pasador paralelo al eje del miembro.

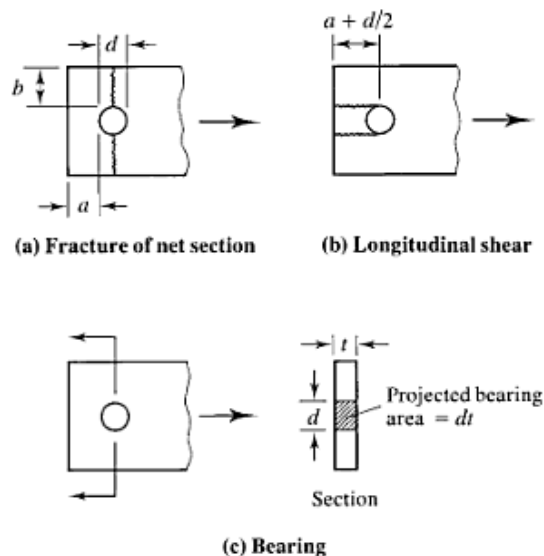


Figura 3. Miembros conectados por pasadores (William T. Seguí).

## Conexiones soldadas

La soldadura estructural es un proceso por medio del cual las partes por conectarse son calentadas y fundidas con metal fundido de aportación agregado a la junta. Una relativamente pequeña profundidad de material se fundirá y, al enfriarse, el acero estructural y el metal de aportación actuarán como una parte continua donde ellos se unen. El metal adicional es depositado por un electrodo especial, que es parte de un circuito eléctrico que incluye a la parte conectada o metal



base.<sup>16</sup>

Existen diferentes tipos de soldaduras entre ellas tenemos: posterior, filete, tapón o ranura. En el caso del tapón o ranura esta se divide a su vez en: cuadrado, en V, bisel, en U, en J, ensanchamiento en V y ensanchamiento de bisel.

## Normativa nacional sobre conexiones con soldadura

En la sección 10.1.3.4 del Código Sísmico de Costa Rica 2010 se mencionan los requerimientos mínimos a los que deben ser sometidos este tipo de uniones. Básicamente se analizan cuatro aspectos, mencionados a continuación:

- a) Soldaduras de los sistemas sismorresistentes: todas las soldaduras que sean parte del sistema sismorresistente deben ser ejecutadas con material de aporte que cumpla con las propiedades mecánicas de la siguiente tabla:

Propiedades	Clasificación del material de aporte	
	Grado 70 (4900 kg/cm <sup>2</sup> )	Grado 80 (5600 kg/cm <sup>2</sup> )
Esfuerzo de cedencia, $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4060 mín.	4760 mín.
Esfuerzo último, $F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4900 mín.	5600 mín.
Elongación (%)	22 mín.	19 mín.
Tenacidad de Charpy CVN	276 kg-cm (mín.) a -18°C	

**Figura 4.** Propiedades mecánicas para material de aporte en soldaduras del sistema sismorresistente. (Tabla 10.2 CSCR 2010).

- b) Soldaduras críticas por demanda: todas las soldaduras que sean parte del sistema sismorresistente y que sean clasificadas como críticas por demanda, deben ser ejecutadas con material de aporte que cumpla con las propiedades mecánicas de la siguiente tabla:

Propiedades	Clasificación del material de aporte	
	Grado 70 (4900kg/cm <sup>2</sup> )	Grado 80 (5600kg/cm <sup>2</sup> )
Esfuerzo de cedencia, $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4060 mín.	4760 mín.
Esfuerzo último, $F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4900 mín.	5600 mín.
Elongación (%)	22 mín.	19 mín.
Tenacidad de Charpy CVN	552 kg-cm (mín.) a -18°C	

**Figura 5.** Propiedades mecánicas para material de aporte en soldaduras críticas por demanda. (Tabla 10.3 CSCR 2010).

En este caso, para demostrar que el material de aporte cumple con los requerimientos, el fabricante de la estructura debe someter para aprobación alguno de los siguientes documentos:

1. Certificados de conformidad del proveedor de electrodos.
  2. Los informes de ensayos realizados.
- c) Soldaduras críticas por demanda de bajas temperaturas: cuando la temperatura mínima de servicio esperada del sistema sismorresistente sea inferior a +10 °C, se deben realizar los ensayos de envolvente de calor de aporte para todos los tipos de electrodos utilizados en las soldaduras críticas por demanda.
- d) Uniformidad del material de aporte: para garantizar la uniformidad del material de aporte utilizado en las soldaduras críticas por demanda, todos los electrodos deben ser del mismo fabricante y proveedor. No se permite el uso de electrodos distintos en una misma soldadura.

## Soldadura de filete

El diseño y análisis de las soldaduras de filete se basan en la suposición de que la sección transversal de la soldadura es un triángulo rectángulo a 45°. Cualquier material agregado fuera de la hipotenusa del triángulo o penetración son despreciados. Los tamaños estándar de las soldaduras se especifican en incrementos de 1/16 de pulgada.

Sobre el área efectiva el AISC menciona en el capítulo J2 algunas especificaciones que se deben seguir, entre las más importantes están:

- El área efectiva de una soldadura de filete será la longitud efectiva multiplicada por la garganta efectiva. La garganta efectiva de la soldadura de filete debe ser la menor distancia desde la raíz hasta la superficie de la soldadura.
- Para soldaduras de filete en perforaciones y ranuras, la longitud efectiva debe ser la longitud del eje central de la soldadura a lo largo del plano que pasa a través de la garganta. En el caso de

<sup>16</sup> T. Seguí, Diseño de estructuras de acero con LRFD.

filetes traslapados, el área efectiva no debe exceder el área nominal de la perforación o ranura.

## Limitaciones

De igual forma el capítulo J en la sección 2b del AISC menciona algunas de las limitaciones que se deben tomar en cuenta tanto para el diseño como para la revisión de la soldadura, algunos de los puntos que se mencionan son: el tamaño mínimo y máximo de la soldadura y la longitud efectiva.

El tamaño mínimo de las soldaduras de filete no debe ser menor que el tamaño requerido para transmitir las fuerzas calculadas, ni menor que la tabla J2.4 especificada en el manual del AISC. Estas disposiciones no aplican para refuerzos de soldadura de filete en soldaduras con junta de penetración parcia o completa.

Tabla J 2.4 Tamaño Mínimo de Soldadura de Filete	
Espesor de la parte unida más delgada, mm	Tamaño mínimo de soldadura de filete <sup>[a]</sup> , mm
Hasta 6 inclusive	3
Entre 6 y 13	5
Entre 13 y 19	6
Mayor que 19	8

[a] Dimensión del pie de la soldadura de filete. Se deben utilizar soldaduras de paso simple.

Figura 6. Tamaño mínimo soldadura filete (Capitulo J, sección 2b, AISC).

El tamaño máximo de soldaduras de filete para partes conectadas debe ser:

- A lo largo de los bordes del material con espesor menor a 6mm, no mayor que el espesor del material.
- A lo largo del borde del material con espesor igual o mayor a 6mm, no mayor que el espesor del material menos 2mm, a no ser que la soldadura sea designada especialmente en los planos para ser ejecutada de manera que se obtenga el espesor de la garganta completa. En la condición de soldado, se permite que la distancia entre el borde del metal base y el talón de la soldadura sea menor que 2 mm, siempre que sea posible verificar el tamaño de la soldadura.

Con respecto a la longitud efectiva, este

mismo capítulo menciona que:

- La longitud efectiva mínima de las soldaduras de filete diseñadas por resistencia no debe ser menor que cuatro veces el tamaño nominal, en caso contrario, se debe considerar que el tamaño de la soldadura no exceda un cuarto de su longitud efectiva. Cuando las soldaduras de filete longitudinales son empleadas solamente en conexiones de los extremos de los miembros modelados, como estructuras de barras planas solicitadas a tracción; la longitud de cada filete de soldadura no debe ser menor que la distancia perpendicular entre ellas.

## Resistencia de la soldadura

Aunque una longitud de soldadura puede cargarse en cualquier dirección en cortante, compresión o tensión, un filete de soldadura es más débil en cortante y siempre se supone que falla de esta manera. Específicamente, se supone que la falla ocurre por cortante sobre un plano a través de la garganta de la soldadura.<sup>17</sup>

Debido a este modo de falla, el análisis principal se basará en el cortante crítico, este viene dado por:

$$fv = \frac{P}{0,707 * w * L} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde L es la longitud de la soldadura sometida a la carga P y w es el tamaño de la soldadura, además 0,707 es la distancia perpendicular de la esquina o raíz de la soldadura a la hipotenusa.

Empleando en esta ecuación el esfuerzo cortante último de la soldadura, Fw, la capacidad nominal de la soldadura es:

$$Rn = 0,707 * w * L * Fw \quad (\text{ecuación 4})$$

Mientras que la resistencia nominal (última) viene dada por:

$$\phi Rn = 0,707 * w * L * \phi Fw \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde  $\phi = 0,75$

La resistencia de la soldadura depende del electrodo, que se define como la resistencia última en tensión del material de aportación, que generalmente es de 60, 70, 80, 90,100 Kips.

<sup>17</sup> T.Segui, Diseño de estructuras de acero con LRFD

Entonces la resistencia del electrodo se toma como un 60% de su resistencia.

$$F_w = 0,6 * F_{exx} \quad (\text{ecuación 6})$$

Un requisito adicional es que el cortante por carga factorizada sobre el metal base no debe generar un esfuerzo en exceso  $\phi F_{BM}$  donde  $F_{BM}$  es la resistencia nominal por cortante del material conectado. La carga factorizada sobre la conexión está entonces sujeta a un límite de

$$\phi R_n = \phi F_{BM} * A. \text{ del metal base sometida a cortante}$$

$$\text{Donde } \phi = 0,9 \text{ y } R_n = 0,6 * A_g * F_y$$

La resistencia por cortante del metal base puede por lo tanto tomarse como:

$$\phi F_{BM} = 0,54 * F_y \quad (\text{ecuación 7})$$

## Elementos referentes a teoría de concreto

El caso de la longitud que desarrollan las varillas que se encuentran embebidas en el concreto, es necesario, para su análisis, referirse a la teoría de concreto referente a este tema.

## Longitud de desarrollo

El concepto de longitud de desarrollo se basa en el esfuerzo de adherencia obtenible sobre la longitud embebida del refuerzo. Las longitudes de desarrollo especificadas se requieren, en gran medida, por la tendencia de las barras sometidas a esfuerzos altos a fisurar el concreto que retiene la barra cuando las secciones de concreto son relativamente delgadas. Una barra individual embebida en una masa de concreto no necesita una longitud de desarrollo tan grande; aunque una fila de barras, aun en concreto masivo, puede crear un plano débil con agrietamiento longitudinal a lo largo del plano de dichas barras.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> ACI; Requisitos de reglamento para concreto estructural y Comentario.

Para este tema existen regulaciones tanto nacionales como internacionales, en el caso de nuestro país los requerimientos mínimos se mencionan en la sección 8,5 del Código Sísmico de Costa Rica 2010, mientras que internacionalmente el American Concrete Institute desarrolla este tema en el capítulo 12.2 del Reglamento para concreto estructural.

## Longitud de desarrollo CSCR 2010

En este caso nuestro código menciona los siguientes puntos a tomar en cuenta:

a) La longitud de anclaje ( $l_{ag}$ ) para barras de dimensiones #3 a #11, con un gancho estándar, no pueden ser menor que ocho veces el diámetro de la barra, 15cm o la longitud indicada en la siguiente ecuación:

$$l_{ag} = \frac{F_y * d_b}{16\sqrt{f'_c}} \quad (\text{ecuación 8})$$

b) El gancho estándar debe estar colocado dentro del núcleo confinado de una columna o de un elemento de borde.

c) La longitud de anclaje ( $l_{ar}$ ) para barras rectas de dimensiones #3 a #11, no pueden ser menor que 2,5  $l_{ag}$ .

d) Las barras rectas que terminan en un núcleo de unión deben pasar a través de la parte confinada del núcleo o del elemento de borde. Si no en la región confinada se debe incrementar 1,6.

## Longitud de desarrollo ACI

El capítulo 12.2 del ACI indica que la longitud de desarrollo para barras corrugadas en tracción,  $l_d$ , debe determinarse con las siguientes ecuaciones, pero no debe ser menor que 30 cm.

	Alambres corrugados o barras No. 19 y menores	Barras No. 22 y mayores
<p>Espaciamiento libre entre barras o alambres que están siendo empalmados o desarrolladas no menor que <math>d_b</math>, recubrimiento libre no menor que <math>d_b</math>, y estribos a lo largo de <math>\ell_d</math> no menos que el mínimo del reglamento o</p> <p>espaciamiento libre entre barras o alambres que están siendo desarrolladas o empalmadas no menor a <math>2d_b</math> y recubrimiento libre no menor a <math>d_b</math></p>	$\left( \frac{f_y \Psi_t \Psi_e \lambda}{2.1 \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	$\left( \frac{f_y \Psi_t \Psi_e \lambda}{1.7 \sqrt{f'_c}} \right) d_b$
Otros casos	$\left( \frac{f_y \Psi_t \Psi_e \lambda}{1.4 \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	$\left( \frac{f_y \Psi_t \Psi_e \lambda}{1.1 \sqrt{f'_c}} \right) d_b$

Figura 7. Ecuaciones longitud de desarrollo ACI. (Capítulo 12.2 American Concrete Institute)

## Ganchos estándar ACI

El estudio de fallas de barras con gancho indica que la separación del recubrimiento de concreto en el plano del gancho es la causa principal de falla, y que la separación se origina en la parte menor de 8db y 15 cm.<sup>19</sup> Para barras corrugadas, ldh debe ser:

$$ldh = \left( \frac{0,24 * \Psi_e * \lambda * f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) * db \quad (\text{ecuación 9})$$

Con  $\Psi_e$  igual a 1,2 para refuerzo con recubrimiento de epóxico y,  $\lambda$  igual a 1,3 para concreto liviano. Para otros casos,  $\Psi_e$  y  $\lambda$  deben ser igual a 1

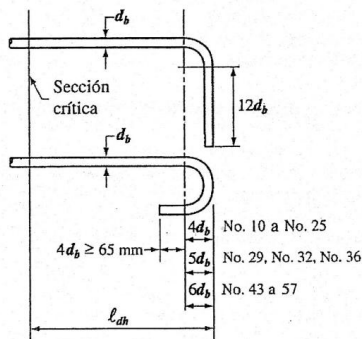


Figura 8. Detalles de barras dobladas para desarrollar el gancho estándar (American Concrete Institute)

<sup>19</sup> ACI; Requisitos de reglamento para concreto estructural y Comentario

# Diseño de Sitio

El objetivo del diseño de sitio consiste en asegurar la planificación adecuada de los aspectos relacionados con las condiciones de infraestructura provisional y de flujos de personal, materiales y equipo en el proyecto, de modo que se den de la forma más eficiente, en línea con la estrategia constructiva definida.<sup>20</sup>

Algunos de los aspectos a considerar para realizar un adecuado diseño de sitio son los siguientes:

- Determinar las limitaciones geográficas y del entorno que se presentan en el sitio, esto quiere decir cercanía de líneas eléctricas, tránsito vehicular, anchos de calle, distancias a los bordes del cañón, etc.
- Considerar los posibles accesos al sitio, así como sus dimensiones y flujo de utilización durante la obra.
- Ubicación de los elementos en la obra como; instalaciones provisionales (bodegas de almacenaje, cerramientos, talleres, zona de comedor), instalaciones sanitarias y de agua potable, lugares de acopio tanto de materiales como de desechos.
- Planificar los movimientos correspondientes a la ejecución de cada actividad, esto con el fin de asegurarse que durante las obras no se encuentren inconvenientes como falta de espacio para maniobrar o ejecución de movimientos que se consideren peligrosos para los operarios.

En nuestro país el Reglamento de Seguridad en Construcciones brinda algunos lineamientos básicos a considerar para la elaboración de un diseño de sitio. Dentro de algunas de ellas están:

Artículo 7º.- Los materiales empleados en construcción deben ser apilados de modo que no perjudiquen el tránsito de personas o la circulación de materiales o el ingreso de equipo para combate de incendios. Tampoco deben obstruir puertas de salida de emergencia y no provocar empujes sobre paredes que no estén diseñadas para tal fin.

Artículo 126.- En cada centro de trabajo se dispondrá de locales para vestidor y servicios

<sup>20</sup> Brenes Mena, Morales Madriz, Muñoz Molina.

Logística del sitio de Construcción y diseño de proceso constructivo.

sanitarios de acuerdo con el número de trabajadores.

Artículo 129.- Toda construcción dispondrá de abastecimiento suficiente de agua potable en proporción al número de trabajadores. Es prohibido trasegar agua para la bebida por medio de barriles, vasijas, cubos u otros recipientes abiertos o cubiertos provisionalmente.

Artículo 130.- Es necesaria la existencia de servicios higiénicos dotados de agua corriente que deberán conectarse a las previstas de aguas tanto potables como servidas. Dicho lugar deberá tener inodoro, lavatorio y papel higiénico.

Artículo 147.- Las instalaciones eléctricas provisionales de obra deberán cumplir con las especificaciones técnicas que determine el Servicio Nacional de Electricidad.

# Seguridad en la construcción

## Plan de seguridad

El éxito de un proyecto de construcción no solo se basa en la premisa de concluirlo dentro de un plazo dado y manteniendo la calidad de los trabajos, sino, además, es necesario que al finalizar la obra la cantidad de accidentes y personas lesionadas sea mínima. Esto solo se logra mediante la elaboración de un plan de seguridad laboral que tome en cuenta tanto la naturaleza del trabajo así como las condiciones ambientales que le rodean.

El plan de seguridad y salud debe establecer las condiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción de los puentes, en razón de que constituye un instrumento básico de las actividades de identificación y, en su caso, evaluación de los riesgos y planificación de las acciones preventivas en los puestos de trabajo.<sup>21</sup>

Para la correcta elaboración de un plan de seguridad, existen tres aspectos fundamentales los cuales deben ser tomados en cuenta a la hora de realizar, estos son: Una lista de actividades y

---

<sup>21</sup> Navarro Quesada Manuel, Seguridad en la construcción de puentes.

recursos, identificación y evaluación de riesgos y finalmente las medidas preventivas.

## Lista de actividades y recursos

Este consiste en un desglose de todas aquellas actividades necesarias para la ejecución de las obras, y de los recursos que serán necesarios en cada una de ellas. En primera instancia, se debe definir cuáles son las tareas principales, ya que estas son la base de una serie de actividades secundarias que nos ayudarán a identificar de una manera más específica los recursos que serán utilizados.

Este rubro es muy importante, pues de esta manera se podrá conocer más claramente a qué peligros están expuestos los trabajadores en cada punto de la obra y facilitará la elección de los dispositivos necesarios para prevenir posibles accidentes.

## Identificación y evaluación de riesgos

El resultado de una identificación y evaluación de los peligros debe servir para hacer un inventario de acciones, con el fin de diseñar, mantener o mejorar los controles. Es necesario contar con un buen procedimiento para planificar la implantación de las medidas de control que sean precisas después de la evaluación de los riesgos.<sup>22</sup>

El primer paso a seguir para detectar de manera adecuada los riesgos a los que están expuestos los trabajadores, consiste en la recolección de información relevante. Para esto se debe tener claro la lista de actividades y recursos, ya con ella se conocerá la zona de trabajo, así como los posibles peligros a los que se está expuesto. Es importante tener pleno conocimiento del sitio, pues se deben considerar factores ambientales y limitantes geométricas, por ello se debe recurrir a recursos como: planos constructivos, levantamientos topográficos de la

---

<sup>22</sup> Gobierno de Navarra. Identificación de Riesgos Laborales, Medidas Preventivas y Evaluación en la construcción de puentes y túneles.

zona de trabajo, estudios meteorológicos, estudios del comportamiento del tráfico, etc.

Una vez que se identifican los posibles riesgos que se pueden presentar durante el desarrollo de la obra, se continúa con la clasificación de la magnitud del riesgo. Existen tres factores fundamentales que se deben tomar en cuenta cuando se realiza esta evaluación:

- La probabilidad de que un determinado peligro cause daños (si es improbable, posible pero no probable, probable o inevitable con el tiempo).
- La gravedad probable del daño en cuestión (si causa un daño leve, un incidente que no constituye lesión, una lesión leve (contusión, laceración), una lesión grave (fractura, amputación, enfermedad crónica), o fallecimiento de varias personas).
- La frecuencia con que se ven expuestos los trabajadores (y el número de estos).<sup>23</sup>

Una forma adecuada de mostrar los resultados de este estudio es mediante la elaboración de una matriz de riesgo. Esta permite evaluar en cada actividad la posible incidencia y magnitud de un accidente; utiliza una escala de colores y numérica para determinar los tres factores antes mencionados. En nuestro país no existe un formato estándar para la elaboración de una matriz de riesgo, sin embargo una de las más utilizadas es la de la OSHA (Occupational Safety and Health Administration) mostrada a continuación.

Matriz de riesgo de acuerdo con OSHAS 18001						
Riesgo = Probabilidad * Frecuencia * Efecto						
Probabilidad	Casi imposible	Posible, pero muy improbable	No es probable, pero posible	Poco Común	Muy Posible	A esperarse
→	0,2	0,3	1	3	6	10
Frecuencia	Extremadamente raro (- de una vez por año)	Raro (una vez por año)	Algunas veces (una vez por mes)	De vez en cuando (una vez por semana)	Con frecuencia (todos los días)	Continuamente
→	0,5	1	2	3	6	10
Efecto	↓					
Accidente sólo con tratamiento de primeros auxilios	insignificante	insignificante	insignificante	Aceptable	No deseado	No aceptable
1	0,1	0,3	2	9	36	100
Accidente con pérdida de días laborales	insignificante	insignificante	Aceptable	No deseado	No aceptable	No aceptable
3	0,3	0,9	6	27	108	300
Accidente severo con lesiones incurables	insignificante	Aceptable	Aceptable	No deseado	No aceptable	No aceptable
7	0,7	2,1	14	63	252	700
Accidente fatal o efecto a largo plazo	insignificante	Aceptable	No deseado	No aceptable	No aceptable	No aceptable
15	1,5	4,5	30	135	540	1500
Desastre con varias víctimas	Aceptable	Aceptable	No aceptable	No aceptable	No aceptable	No aceptable
40	4	12	80	360	1440	4000

Figura 9. Matriz de riesgo (OSHA 18001)

## Medidas preventivas

Estas corresponden a todos los procedimientos y equipos implementados con el fin de resguardar la integridad de los trabajadores. Deben escogerse teniendo en cuenta los siguientes principios:

- Combatir los riesgos en su origen.
- Adaptar el trabajo a la persona en particular.
- Tener en cuenta la evolución de la técnica.
- Sustituir lo peligroso por lo que cause poco o ningún peligro.
- Adoptar las medidas que antepongan la protección colectiva a la individual.
- Dar las debidas instrucciones a los trabajadores.<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Agencia europea para la seguridad y la salud en el trabajo.

<sup>24</sup> Gobierno de Navarra. Identificación de Riesgos Laborales, Medidas Preventivas y Evaluación en la construcción de puentes y túneles.

# Metodología

Como parte del análisis a realizar es importante tener un esquema básico de cómo se abordará cada objetivo planteado para este trabajo. Debido a que el alcance de este proyecto se enfoca en varios aspectos, es necesario abordar cada uno de manera individual con el fin de obtener resultados para cada uno de ellos.

Según el orden de los objetivos, lo primero que se debe realizar es un análisis de la situación del proyecto, el cual va desde su planteamiento inicial hasta el estado actual del mismo, esto con el fin de entender en qué consiste el proyecto, cómo se pretende construir, qué limitantes se han presentado y a qué conclusiones se ha llegado. Para esto la UEN-Administración de Proyectos proporcionará una serie de documentos; entre ellos las propuestas del proceso constructivo y montaje del puente sobre el río Virilla elaborados por la empresa Fernández Vaglio, documentos con recomendaciones elaboradas por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y otros consultores, etc. Con la lectura y análisis de los mismos se espera comprender la situación del proyecto y cómo pretende la empresa constructora cumplir con los objetivos planteados.

Posteriormente es necesario para un mejor entendimiento del proyecto dividir los diferentes aspectos tratados en la metodología en cuatro puntos diferentes e ir clasificando cada objetivo según su naturaleza.

1.1) Obtener de los documentos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, información referente al sitio.

Para la elaboración del diseño de sitio, se solicitó el archivo fotográfico del lugar, el cual fue hecho y facilitado por Acueductos y Alcantarillados junto con una serie de levantamientos que incluye mediciones de algunos elementos importantes tales como: ancho de calle, distancias a bordes, dimensiones de elementos, etc.

1.2) Visitas al sitio para realizar mediciones y crear un archivo fotográfico de la zona.

Como parte de la recopilación de información se hicieron al menos tres visitas al sitio, con la finalidad de verificar medidas y documentar en forma fotográfica algunos elementos importantes.

1.3) Realizar el esquema del sitio y posteriormente el diseño del sitio.

Se realizó un levantamiento en Autocad utilizando los datos recopilados y el programa de visualización satelital google earth, ya con un croquis adecuado del sitio se procedió a elaborar el diseño de sitio tomando en cuenta las necesidades propias del lugar y las limitaciones que el mismo presentaba.

## Respecto al diseño de sitio

Objetivo: Elaborar una propuesta de diseño de sitio considerando las limitaciones geométricas presentes en el mismo.

## Respecto a la capacidad de los elementos

## Análisis del elemento de transición entre torre y cables

Objetivo: Analizar la condición del nudo de transición entre elementos rígidos (anclaje-torre) y elementos principales (torre a torre), considerando la parte constructiva y eficiencia de la misma.

### Desde el punto de vista constructivo

2.1) Por medio del documento brindado por la empresa constructora, establecer la metodología constructiva que se pretende utilizar.

En el caso del método constructivo fue necesario revisar el documento presentado por la empresa constructora, sin embargo es este no se encontró referencia de esta actividad. Al consultar a dicha empresa, esta aclaró la metodología empleada, la cual se procedió a explicar y analizar.

2.2) Consulta de planos constructivos con el fin de analizar la validez de la metodología constructiva establecida por la empresa constructora.

Se redactó el método constructivo que se pretende utilizar y se apoyó la explicación con imágenes elaboradas con el programa Sketchup 8 basadas en los planos constructivos. Con estos elementos se realizó el análisis tomando en cuenta los posibles beneficios y debilidades del planteamiento constructivo.

### Desde el punto de vista de capacidad del elemento

2.3) Revisar la normativa respecto a las conexiones realizadas por medio de un pasador.

En lo que respecta al análisis de la capacidad del elemento se determina que este corresponde al diseño de un miembro conectado por pasador, en el AISC el diseño de este tipo de elementos corresponde al capítulo D5.

2.4) Evaluar según lo determinado en la teoría la capacidad del elemento propuesto.

Para la revisión de la pieza es necesario que la misma cumpla con ciertos requerimientos dimensionales, además se debe cumplir con los estados límite de rotura en tracción, rotura en corte, aplastamiento y fluencia; seguidamente se presenta la formulación seguida para realizar la revisión según lo especificado en el AISC.

En el caso de la rotura en tracción en el área neta efectiva esta será:

$$P_n = 2t * beff * F_u \quad (\text{ecuación 10})$$
$$\Phi_t = 0,75$$

Para la rotura en corte en el área efectiva, tenemos:

$$P_n = 0,6 * F_u * A_{sf} \quad (\text{ecuación 11})$$
$$\Phi_{sf} = 0,75$$

Donde

$$A_{sf} = 2t \left( a + \frac{d}{2} \right) \quad (\text{ecuación 12})$$

$a$  = distancia más corta desde el borde de la perforación del pasador hasta el borde del miembro medido paralelamente a la dirección de la fuerza, en cm.

$beff = 2t + 1,6$  (cm) pero no más que la distancia actual entre el borde de la parte medida en la dirección normal a la fuerza aplicada.

$d$  = diámetro del pasador (cm).

$t$  = espesor de la placa (cm).

Aplastamiento en el área proyectada del pasador (sección J7 del AISC)

$$P_n = 1,8 * F_y * A_{\text{proyectada de aplast.}} \quad (\text{ec. 13})$$
$$\Phi = 0,75$$

Fluencia en la sección bruta (sección D2-1 del AISC)

$$P_n = F_y * A_g \quad (\text{ecuación 14})$$
$$\Phi = 0,9$$

Los valores obtenidos en este análisis se compararon con los resultados del análisis estructural, los cuales brindó Acueductos y Alcantarillados. Posteriormente se corroboró que



no se sobrepasará ninguno de los estados límites antes mencionados.

Luego se revisaron los requerimientos dimensionales planteados en la norma, estos resultados fueron comparados con las dimensiones de este elemento que se especificaban en los planos. Estos requerimientos dimensionales son:

$$b_{eff} = 2t * 1.6002 \text{ cm}$$

$$a \geq 1.33 * b_{eff}$$

$$w \geq 2b_{eff} + d$$

$$c \geq a$$

2.5) Consultar el proveedor de los accesorios que se pretenden utilizar en la conexión.

Se realizó la revisión de la terminal de vaciado abierta que se encarga de unir los cables con el pasador, para esto se obtuvo de los planos las especificaciones de la pieza, la cual es fabricada por la empresa Crosby, posteriormente, mediante el catálogo del producto, se determinó la capacidad de rotura mínima garantizada por el proveedor y se comparó con la capacidad requerida según el análisis estructural brindado.

## **Análisis del elemento de arriostamiento de las torres**

Objetivo: Analizar desde el punto de vista de factibilidad constructiva y de eficiencia mecánica, el tramo lateral del puente (unión entre anclaje activo y torre).

### **Desde el punto de vista constructivo**

3.1) Por medio del documento brindado por la empresa constructora, establecer la metodología constructiva que se pretende utilizar.

En lo que respecta a la parte constructiva es necesario, nuevamente, referirnos al documento "Proceso constructivo y montaje de puente sobre el río Virilla" con el fin de determinar si existe

alguna referencia sobre el método constructivo del arriostre.

3.2) Elaborar un listado de subactividades correspondientes a esta actividad.

Para elaborar la propuesta constructiva se debe elaborar, en primera instancia, un listado de actividades necesarias para la ejecución de la obra, posterior a esto se propone una secuencia de trabajos que mantenga un orden lógico.

3.3) Definir las limitaciones geométricas de cada actividad.

Se realizaron consideraciones del sitio de trabajo, ya que algunas actividades debieron de planearse tomando en cuenta las limitaciones de espacio en la zona.

### **Desde el punto de vista de capacidad del elemento**

3.4) Se establecieron los diferentes puntos de análisis que se querían revisar en este elemento.

Se revisaron los siguientes aspectos; estados límite de falla y fractura, capacidad de la transición del perfil W a varillas #8, longitud de desarrollo y soldaduras ubicadas en la unión entre torre - arriostre.

3.5) Definir las características del elemento.

En lo que respecta a la revisión de la capacidad del elemento, el primer paso fue obtener de las tablas del AISC las propiedades correspondientes al perfil W12x50.

3.6) Revisar la teoría correspondiente a miembros sometidos a tensión y evaluar el elemento.

En el caso de la revisión de los estados límite se utilizaron las ecuaciones siguientes:

$$P_u \leq 0,9 * F_y * A_g \quad (\text{ecuación 15})$$

$$P_u \leq 0,75 * F_u * A_e \quad (\text{ecuación 16})$$

Donde  $\Phi_t = 0,9$  representa el factor de resistencia por fluencia y  $\Phi_t = 0,75$  el factor de resistencia por fractura. De la misma forma que en el apartado anterior, estos valores fueron comparados con los requerimientos mostrados en el análisis estructural brindado por AyA para comprobar el cumplimiento o no del elemento.

3.7) Revisión de la capacidad de transición del perfil W a las varillas #8.

Se corroboró que la carga tomada por el perfil iba a ser efectivamente transmitida a las varillas y posteriormente a los anclajes, para esta revisión se siguió el proceso que se muestra a continuación:

$$\Phi * P_n \text{ Varilla} = P_n W12x35$$

$$\Phi * F_y \text{ varilla} * A_g \text{ varilla} = F_y W12x35 * A_g W12x35$$

$$A_g \text{ varilla} = \frac{F_y W12x35 * A_g W12x35}{\Phi * F_y \text{ varilla}}$$

Se parte de la premisa que la resistencia de la varilla debe ser igual a la resistencia del perfil elegido, luego de esto se realiza el despeje de las ecuaciones para obtener el área de acero de las varillas requerido para que se mantenga esta condición de igualdad. Esta área de acero se compara con el área de acero correspondiente a las 14 varillas elegidas y esta última debe ser igual o mayor a la obtenida en el análisis.

3.8) Revisar la teoría correspondiente a miembros conexiones por medio de soldadura y evaluar las conexiones propuestas.

Debido a que la unión se da entre diferentes espesores de materiales, será necesario diseñarla por secciones, pues debido a los requerimientos del AISC el diseño debe tomar en cuenta el espesor de los materiales que une, posterior al diseño de cada uno, la capacidad total será la suma de todas juntas.

En este caso se realizó el diseño de cuatro soldaduras diferentes, las cuales se diseñaron como soldaduras de tipo filete, por lo que la metodología fue la misma, en cuyo caso el único cambio se dio en la longitud de soldadura y tamaño máximo y mínimo de garganta.

3.9) Revisar la teoría correspondiente a longitud de desarrollo y evaluar las longitudes propuestas.

En este caso se aborda el problema mediante dos metodologías diferentes y se espera que la longitud propuesta cumpla con ambos requerimientos. En primera instancia se utilizó el planteamiento de la sección 8.5 del Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Por otra parte se utiliza la metodología brindada por el ACI en la sección 12.5.2, donde se especifica la longitud del gancho.

Con estos dos valores se procede únicamente a comprobar que la longitud de desarrollo especificada en planos sea mayor que la longitud de desarrollo calculada por medio de ambos métodos.

## Respecto a la parte constructiva

### Análisis comparativo de las propuestas de montaje

Objetivo: Realizar un análisis comparativo entre la propuesta inicial para el montaje del puente utilizando grúas tipo camión y la propuesta del montaje utilizando un sistema de cables secundarios con una grúa tipo teleférico.

4.1) Determinar la propuesta de montaje planteada por la empresa constructora

Para elaborar una comparación entre los métodos de montaje por medio de grúas camión colocadas en la superficie de ruedo del puente y la utilización de cables secundarios y “grúa teleférico” se requirió analizar lo planteado por la empresa Fernández Vaglio en el documento “Proceso constructivo y montaje de puente sobre Río Virilla”, donde se presentaba la propuesta de la utilización de grúas tipo camión, por lo que se procedió a evaluar las ventajas y desventajas del mismo.

4.2) Determinar las principales limitaciones geométricas y ambientales de la zona, con el fin de establecer puntos para la comparación entre los métodos propuestos.

Luego del análisis se propusieron cuatro puntos de comparación, los cuales se consideraron determinantes para realizar la elección del sistema más adecuado desde el punto de vista constructivo. Estos cuatro puntos fueron: influencia sobre el tránsito vehicular, movimientos cerca de los cables eléctricos, posicionamiento de las cerchas entre los cables principales y procedimiento de montaje de las cerchas. Cada uno de estos puntos fue analizado tomando en cuenta el movimiento realizado y las dimensiones tanto del sitio como de los diferentes elementos.

En lo que respecta al montaje por medio de cables secundarios, no existía un documento explicativo del proceso a realizar, sin embargo, en diferentes reuniones este se explicó, además se consultó bibliografía y se analizaron algunos proyectos anteriores del AyA que utilizaron este procedimiento.

## **Determinación de la flecha; antes, durante y después del montaje de la estructura**

Objetivo: Determinar la flecha que debe tener el cable, antes, durante y después del montaje de la estructura del puente.

5.1) Establecer el requerimiento solicitado por Acueductos y Alcantarillados en el caso de la longitud máxima de la flecha.

La posición final de la flecha debe ser tal que esta no debe sobrepasar los 12,21 metros medidos de la línea imaginaria trazada entre ambas torres. Esto porque al sobrepasar esta longitud el cable quedaría por debajo de la posición final de la cercha e impediría la colocación de las péndolas para sujetar la estructura mencionada.

5.2) Definir los casos de análisis para las condiciones que se desean estudiar.

Para realizar el cálculo de estas tres condiciones de carga se elaboró un análisis de elementos finitos por medio de un programa, para este caso

se utilizó el programa de análisis estructural SAP 2000 y se modelaron tres diferentes condiciones de carga. La flecha inicial cuya geometría es la primera en cualquiera de los tres modelos, fue determinada previamente por el diseñador, luego se realizó el cálculo de los tres estados de carga diferentes. El primero consistía en colocar en el cable únicamente las cargas debidas al efecto del peso de la estructura tipo cercha, sin considerar el tubo de 900 milímetros, posteriormente, en un segundo modelo, se considera tanto el peso de la estructura como el peso provocado por el tubo de 900 milímetros, con la premisa de que este estará vacío y por último la carga consiste en los elementos antes mencionados, pero en este caso el tubo sí se considera lleno de agua. Estas cargas fueron especificadas en los cálculos realizados por el diseñador, aunada a estas se colocó una carga temporal y una carga de suspensión.

5.3) Realizar el modelo del cable por medio de un programa para evaluar los diferentes estados de carga.

Para la elaboración del modelo del cable se utilizó la opción del SAP 2000 que permite la modelación de cables realizando un análisis no lineal. A continuación se detallan los pasos seguidos para modelar el cable:

El primer paso consiste en definir el material con el que se va a trabajar; en este caso un cable de acero, para esto se debe entrar a la opción "define" y posteriormente "materials". Ya en esta opción se debe crear un nuevo material y especificar algunas características para que el modelo de cable posea rasgos similares a las del cable real.

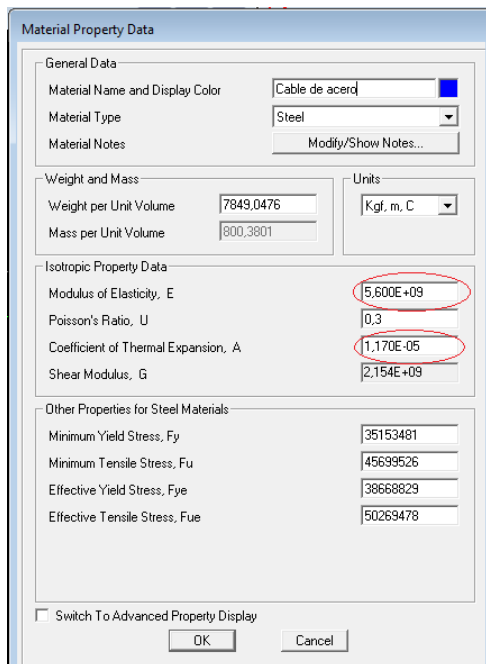


Figura 10. Definir material (SAP 2000 V14).

En el caso de nuestro modelo, el diseñador indica el módulo de elasticidad que fue brindado por el fabricante y en caso del coeficiente de expansión térmica se considera el típico de un cable de acero. Posterior a esto es importante definir los casos que se desean evaluar y recordar que este es un análisis no lineal, ya que si se hace con un lineal el programa entrega resultados erróneos, para esta operación se debe ingresar en el menú define y luego define "load cases" para crear un caso de análisis.

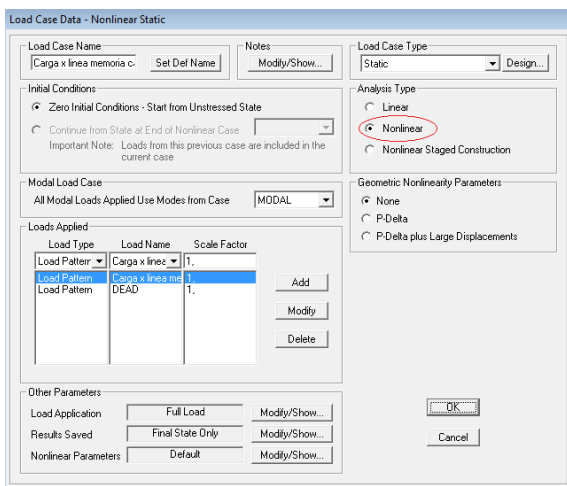


Figura 11. Definición de casos de análisis (SAP 2000 V14).

De esta forma se elabora un solo caso ("case") y dentro de este se agregan las cargas generadas por peso propio (DEAD). Esta decisión se toma basada en las recomendaciones del tutorial "Cable Analysis in SAP 2000" elaborado por el Ingeniero Masaud Akhter. Seguidamente se procede a dibujar la parábola del cable, previo a esto se definió una grid con las dimensiones propias del proyecto, para ello se accede a la opción Draw frame/cable elements y se abrirá una ventana con la opción properties of Object que en este caso corresponde a cable y se selecciona el material que previamente habíamos definido.

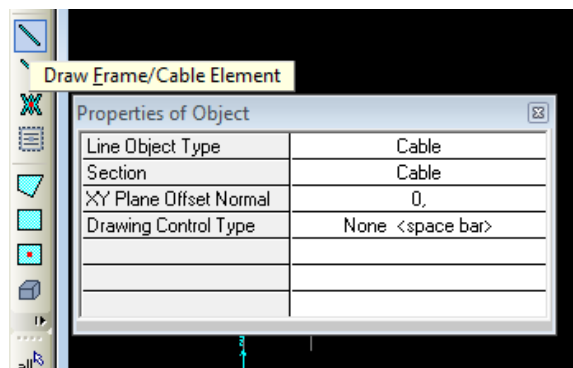


Figura 12. Procedimiento de dibujo (SAP 2000 V14).

Al dibujar la sección se abrirá una ventana con una serie de opciones relacionadas con la geometría del cable, en el cuadro de diálogo "cable geometry" aparece la opción cable "type" y en ella se encuentra una serie de opciones que se puede elegir según la información que se tenga. Luego se elige la opción "máximo vertical sag" que permite dibujar una parábola respecto a la flecha máxima que se desee analizar.

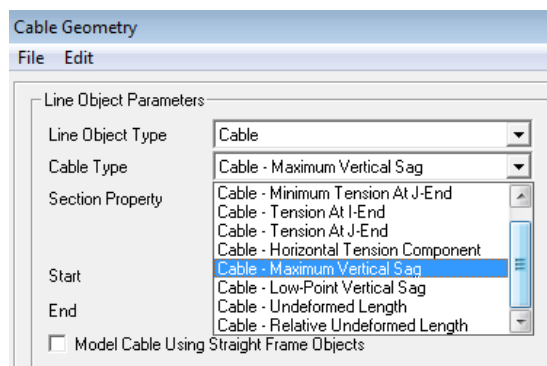


Figura 13. Opción para crear geometría de la parábola. (SAP 2000 V14)

Posteriormente, se deben modificar algunos elementos en esta misma ventana para lograr la geometría desea, en este caso se debió cambiar el número de segmentos de cable (number of cable segments), esto porque los primeros y últimos doce metros del cable no llevan carga más que el peso propio, por eso se debe dividir el cable en varios segmentos con el fin de cargar únicamente las secciones que se requieren. Además se añade el peso por unidad de longitud, este dato se brinda en las tablas del producto dadas por el proveedor y finalmente se coloca la longitud que se desea que tenga la flecha.

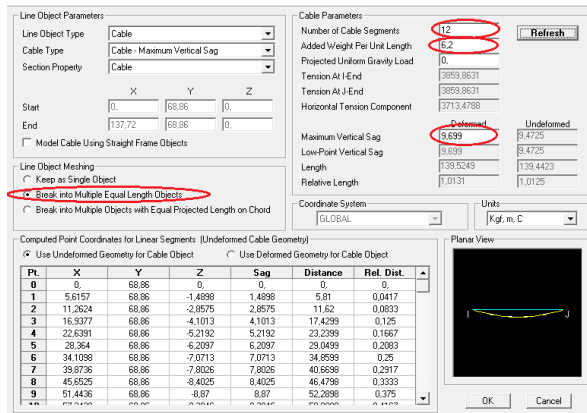


Figura 14. Parámetros de la geometría del cable (SAP 2000 V14).

Quando se terminan de definir los parámetros y se acepta, aparecerá inmediatamente el dibujo de la parábola con la flecha especificada. Seguidamente se le colocan las restricciones en los extremos y se procede a colocar la carga distribuida sobre el cable.

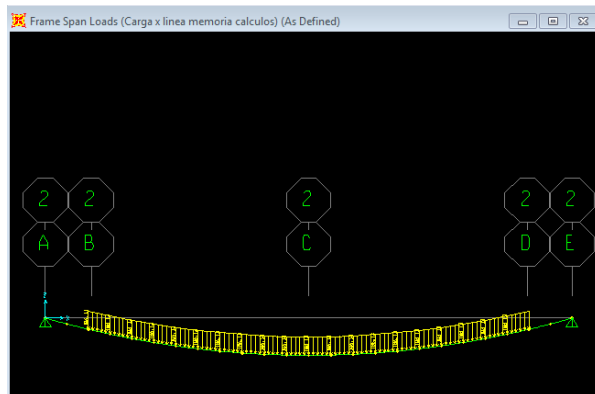


Figura 15. Diagrama de la carga distribuida en el cable. (SAP 2000 V14)

Por último, se procede a realizar el análisis especificando el caso de análisis que previamente fue definido, este paso no debe pasar desapercibido ya que si se deja que el programa analice otros casos los resultados serán erróneos. Para esto se entra en la ventana de analyze y se le da a la pestaña Run, de inmediato se desplegará una ventana donde se especifica los análisis que se ejecutará.

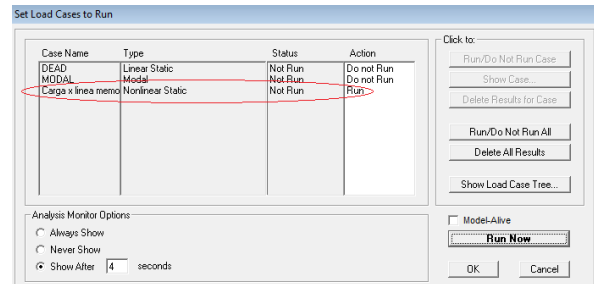


Figura 16. Ventana de selección de casos de análisis (SAP 2000 V14)

Luego de ejecutar el programa se obtienen todos los resultados propios del análisis como: tensiones, reacciones en los apoyos y deformaciones. Una forma de corroborar la validez del modelo es verificando que el cable únicamente presente tensión en los resultados, ya que un cable no debe presentar momentos no cortante. En nuestro caso lo que nos interesa son las deformaciones, puesto que el estudio busca determinar el comportamiento de la flecha frente a los diferentes estados de carga, esta deformación se puede obtener gráficamente colocándose en el punto más bajo de la parábola o si no buscar las tablas de desplazamiento generada por el programa y determinar el valor máximo.

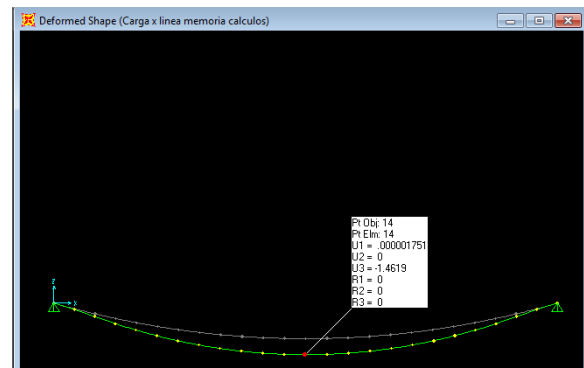


Figura 17. Cambio de flecha obtenido del análisis. (SAP 2000 V14).

El procedimiento mostrado se deberá realizar con los tres estados de carga mencionados con el fin de obtener las tres flechas propias de cada caso y así determinar que desplazamiento ocurrirá entre cada estado de carga.

Cabe mencionar que este mismo procedimiento se utilizó en un estudio aparte realizado por el diseñador, sin embargo durante la revisión del mismo se encontraron algunas divergencias en el modo que se aplicaron las cargas, así como en la carga permanente debida al peso de la cercha. Por este motivo el AyA solicitó este análisis con las condiciones y modelo elaborado por el autor.

## **Análisis del montaje de la estructura tipo cercha**

Objetivo: Analizar las propuestas existentes para realizar el montaje de las cerchas del puente, ya sea iniciando en uno de los extremos o en el centro a los bordes.

6.1) Definir las dos opciones propuestas para el montaje de los elementos tipo cercha.

Existen dos opciones para cargar el cable al hacer la colocación de la estructura. En el primer caso se propone que la cercha se coloque iniciando desde uno de los bordes del cañón e ir avanzando hasta llegar al otro borde del mismo. Como segunda opción, se sugiere partiendo desde el centro de la luz del puente para posteriormente avanzar hacia los bordes, cargando el cable en forma simétrica para compensar deformaciones del mismo. En este caso solo se plantean dos procedimientos, ya que una de las premisas de Acueductos y Alcantarillados radica en que el “cierre” de la estructura se debe realizar en el extremo o extremos, para evitar realizarlo en el centro de la luz.

6.2) Definir los estados de carga y condiciones propias del análisis del problema.

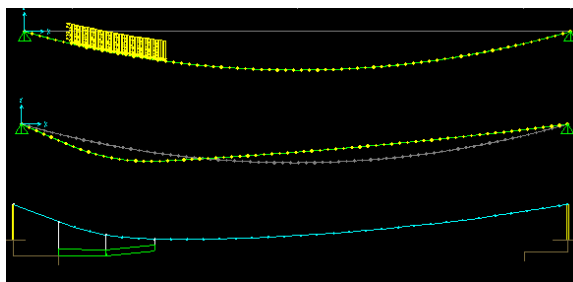
Para este análisis nuevamente se elaboraron dos modelos por medio del programa SAP 2000 esto con el fin de determinar el comportamiento en cada etapa del montaje. Como se trata del mismo

modelo de la sección anterior de este documento, con la única diferencia que los estados de carga cambian, se seguirá el mismo procedimiento determinado en dicha la sección.

En primera instancia se analizó la condición que llamaremos “borde a borde” para esto fue necesario determinar las cargas correspondientes, las cuales son diferentes al punto anterior, ya que en este caso las mismas se deberán repartir únicamente en dos cables, mientras que en la sección anterior el estudio se realizó con una carga repartida entre seis cables, ya que que el proceso de montaje de las cerchas deberá hacerse únicamente con dos cables, pues algunos aspectos constructivos impiden el empleo de los seis cables, por lo que los otros cuatro restantes se colocaran posterior al montaje de la cercha sin el tubo.

Para ambas condiciones se procederá a cargar el cable de la misma manera como se procedería en el campo y posteriormente se obtiene la deformada del cable junto con la tensión máxima, ya que también se busca comprobar si es factible la utilización de solo dos cables para el montaje.

En el caso del análisis del comportamiento de la cercha se evaluará como afecta la deformada del cable al posicionamiento de la cercha durante la colocación, para esto será necesario reproducir el cable deformado en el programa de Autocad y como ya se posee la longitud de cada una de las péndolas en su estado final, esto según planos, basta con dibujarlas en el cable y posteriormente colocar la cercha para obtener un posible comportamiento. En la figura 19 se presenta un ejemplo del procedimiento antes explicado.



**Figura 18.** Procedimiento para el análisis del montaje de la estructura tipo cercha del puente. (Elaboración propia).

En la primer esquema se muestra la carga distribuida sobre el cable correspondiente a las secciones de cercha, dicha carga pertenece a

la sección (es) de cercha sin tubo y la flecha utilizada es la inicial definida por el diseñador. En el segundo esquema se observa la deformación del cable producida por el efecto de las cargas distribuidas y por último se presenta el comportamiento de la cercha respecto a la deformada del cable. Este procedimiento se realizó desde la primera sección de cercha hasta la última con el fin de presentar el fenómeno completo en estudio.

6.3) Estudiar la posibilidad de realizar el montaje utilizando solamente dos cables.

Se obtuvo de los diferentes estados de carga la tensión máxima generada en el cable. Luego se eligió el dato mayor entre los diferentes resultados de tensión máxima. Posteriormente se consultó las tablas del proveedor para obtener la tensión soportada por el cable y se comparó con el resultado obtenido.

## Respecto al plan de seguridad

### Evaluación del plan de seguridad para la construcción del puente

Objetivo: Analizar el plan de seguridad hecho por la empresa constructora.

7.1) Revisar el documento brindado por la empresa constructora.

En primera instancia es necesario analizar el plan de seguridad elaborado por la empresa constructora con el fin de determinar los pasos seguidos y las normas utilizadas en la confección de dicho documento.

7.2) Buscar información sobre la normativa tanto nacional como internacional referente a la seguridad en la construcción.

En este caso se revisaron las normas nacionales como: Reglamento de Seguridad en la Construcción y las normas de INTECO en el caso

de las normas internacionales se revisó la normativa de la OSHA.

7.3) Definir una lista de actividades y recursos para la obra.

Como primer paso fue necesario revisar el cronograma hecho para la ejecución de la obra, con el fin de determinar las actividades principales, posteriormente se realiza un desglose de estas actividades para obtener las subactividades.

En este caso se agregaron subactividades que se consideraron importantes y que fueron dejadas de lado en el cronograma. Esta información fue tabulada y así tener un mejor acceso a la información.

7.4) Establecer una matriz de riesgo para la obra estudiada.

Para la elaboración de la matriz de riesgos se utilizó la metodología de la OSHA 18001, donde se establece que para la evaluación del riesgo es necesario considerar la probabilidad de ocurrencia, el tiempo de exposición a la situación riesgosa y el efecto en la salud provocado por la actividad.

En primera instancia se tomaron las subactividades planteadas en la lista de actividades y recursos para ser tabuladas. Luego se evaluó el riesgo para cada una, por lo que fue necesario determinar su probabilidad, su tiempo de exposición y su efecto de cada subactividad.

Dependiendo de la clasificación del riesgo y de la naturaleza del mismo, se indican los sistemas de protección necesarios para la prevención de accidentes en la actividad analizada.

7.5) Buscar información respecto a los sistemas de protección contra caídas en altura.

Debido a la necesidad de un sistema de protección contra caídas en altura se procedió a la elaboración de una propuesta. Para ello fue necesario considerar que el sistema de montaje utilizado sería el de cables secundarios y "grúa teleférico" con el fin de que esta se adaptara al sistema planteado.

7.6) Proponer un sistema de protección contra caídas que se adapte al sistema de montaje que se pretende utilizar.

Luego de un análisis se determinó que la utilización de un andamio colgante cumple con los requerimientos necesarios para el sitio de trabajo, por ello se busca información de proveedores de este tipo de sistema y se determina que la empresa Accesus cuenta con modelos adecuados para el trabajo. Se elaboran modelos en 3D con las especificaciones de los catálogos y para el caso del sistema de poleas se investiga sobre los teleféricos manuales; se determina que este tipo de sistema se adapta de buena manera al modelo de andamio seleccionado.

## **Caso de la familia que habita debajo del puente vehicular**

Objetivo: Estudiar el caso particular de la familia que vive debajo del puente y proponer estrategias que velen por su seguridad mientras se realiza la obra.

8.1) Realizar visitas al sitio para conocer la situación actual de la familia.

Se realizan visitas al sitio con el fin de tomar mediciones y fotografías para tener un esquema de la casa dentro del área de trabajo y su posible afectación.

8.2) Proponer soluciones basadas en las necesidades de la familia y el costo.

Para determinar la viabilidad de las propuestas se hará un estudio económico en donde se realice una comparación de los costos que se incurrirían al utilizar cualquiera de las propuestas que se planteen.



# Resultados

## Diseño de sitio

El sitio de trabajo se encuentra ubicado en la ruta 147 (Radial Santa Ana - San Rafael de Alajuela) específicamente en el puente del Virilla.



Figura 19. Zona donde se ubica el proyecto

Para el desarrollo del proyecto se trabajará en ambos márgenes del cañón

del río, tanto del lado de Santa Ana como en el lado de San Rafael. Cada uno posee características diferentes, por lo que se analizará de manera independiente sin dejar de lado que la obra se realiza en ambos frentes simultáneamente.

Luego de analizar el documento “Procesos constructivos y montaje de puente sobre el río Virilla”, mostrado en el anexo 1 de este estudio, se encontraron algunas debilidades con respecto al tema del diseño de sitio. En este rubro y debido a las limitaciones de espacio que se posee en ambos frentes de trabajo, la empresa indica que confeccionará los elementos de mayor envergadura (cerchas y preparación del cable) en un plantel ubicado en pozos de Santa Ana, aproximadamente a un kilómetro de donde se realizará la obra. Sin embargo, deja un gran vacío en los aspectos correspondientes al ordenamiento del sitio de trabajo; algunas de las debilidades detectadas son:

- En el documento presentado no se muestra un esquema del sitio de trabajo que muestre las dimensiones aproximadas con que se cuenta para ubicar maquinaria, realizar movimientos, ubicar estructuras temporales, etc.
- No se mencionan cuáles son las limitaciones presentes en la zona de trabajo, esto quiere decir que no se indican los posibles obstáculos que puedan impedir los movimientos de la maquinaria o del personal.
- No se presenta un esquema con la propuesta de diseño de sitio, donde indique la posible colocación de los elementos (baños, bodegas, talleres, zonas de descarga, etc.) y el porqué de esta.
- No se revisa si la maquinaria propuesta y las dimensiones de las piezas utilizadas en el proceso de montaje del puente, se acoplan a

las dimensiones propias del sitio. Con esto se espera corroborar que los movimientos que se deban realizar son factibles de ejecutar.

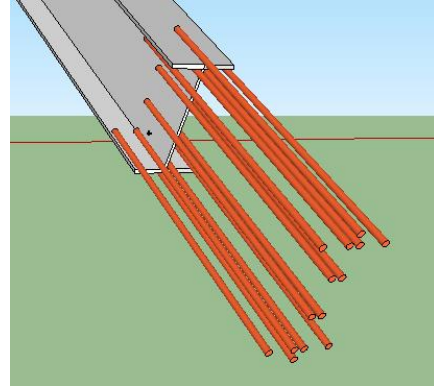
- No se contempla el diseño de sitio externo a la obra, es decir, el plan de señalización que se debe emplear para prevenir a los conductores de los trabajos cercanos.

Debido a los factores mencionados es necesario que se elabore una propuesta de diseño de sitio que tome en cuenta los puntos anteriores.

## Aspectos estructurales y de diseño

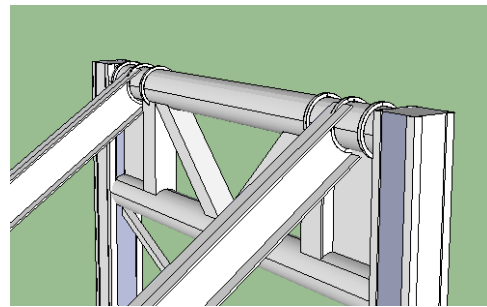
### Análisis del arriostre de las torres

Dentro del documento “Proceso constructivo y montaje de puente sobre río Virilla” (ver anexo 1) no se detalla el proceso que se debe llevar a cabo para la colocación del arriostre del puente. Inicialmente este elemento constaría de un cable de acero que transmitiría las fuerzas desde la torre hasta los bloques de anclaje, sin embargo, luego de diferentes análisis este sistema fue modificado, por lo que ahora se utilizará una perfil W12x50 que será unido a los anclajes por medio de 14 varillas #8 donde una sección de 60cm será embebida en el concreto y otra sección de 15cm será soldada al perfil W.



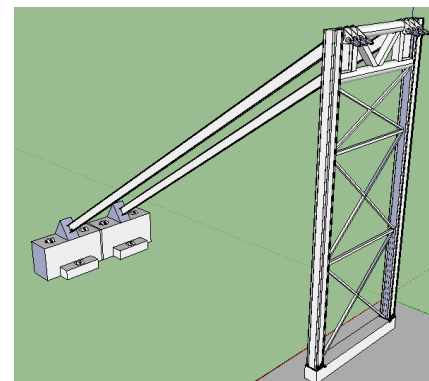
**Figura 20.** Detalle unión perfil W con varillas #8 (Elaboración propia, SketchUp)

En la torre, este elemento será soldado al tubo ubicado en la parte superior de la misma con el fin de que transmita las cargas desde las torres hasta los elementos de anclaje. En la figura 21 se muestra un esquema de la unión descrita anteriormente.



**Figura 21.** Unión entre arriostre y torre (Elaboración propia, Sketcup).

En la figura 22 se presenta un modelo que representa la colocación final del elemento en la estructura del puente.



**Figura 22.** Detalle final de la colocación de los arriostres. (Elaboración propia, SketcUp)

## Revisión de los arriostres

Este elemento solo transmite cargas de tensión debido a su colocación, por ello el análisis solo se realiza para esta fuerza. Las características del elemento se presentan en la siguiente tabla según lo especificado en AISC.

Designation	Area A in. <sup>2</sup>	Depth d		Web		Flange			Distance			
		in.	in.	Thickness t <sub>w</sub> in.	t <sub>w</sub> /2 in.	Width b <sub>f</sub> in.	Thickness t <sub>f</sub> in.	T in.	k in.	k <sub>1</sub> in.		
W12x35	10.3	12.50	12 1/2	0.300	5/16	6.560	6 1/2	0.520	1/2	10 1/2	1	5/16
>30	8.79	12.34	12 3/8	0.260	1/4	6.520	6 1/2	0.440	7/16	10 1/2	15/16	1/2
>26	7.65	12.22	12 1/4	0.230	1/4	6.490	6 1/2	0.380	3/8	10 1/2	7/8	1/2

Figura 23. Dimensiones perfil W12x35 (AISC)

Propuesta	Designación	Area	Fy	Fu
Perfil W	W12x35	66,45 cm <sup>2</sup>	3500 Kg/cm <sup>2</sup>	5250 Kg/cm <sup>2</sup>

Carga última del elemento	210 Toneladas
---------------------------	---------------

## Estados límite de falla y fractura

$$P_u \leq \phi_t * F_y * A_g$$

$\phi_t$ fluencia	0,9
-------------------	-----

$\phi_t * P_n$	209317,5 kg	209,32 Toneladas
----------------	-------------	------------------

$$P_u \leq \phi_t * F_u * A_g$$

$\phi_t$ fractura	0,75
-------------------	------

$\phi_t * P_n$	261646,88 kg	261,65 Toneladas
----------------	--------------	------------------

## Revisión de transición entre el perfil W y las varillas #8

Para la misma se propone una distribución de 14 varillas #8 dispuestas de la siguiente forma:

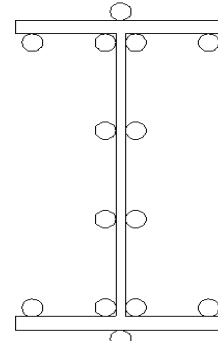


Figura 23. Propuesta para la distribución de Varillas en el perfil W (Planos Constructivos)

As propuesto	71,40 cm <sup>2</sup>
--------------	-----------------------

Fy varilla	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
------------	-------------------------

$$\phi * P_n \text{ varilla} = P_n \text{ W12x35}$$

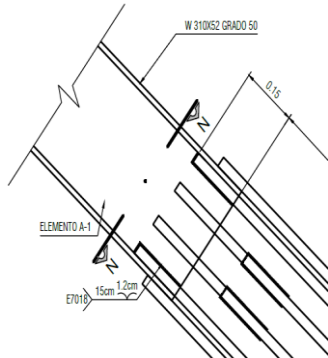
$$\phi * F_y \text{ varilla} * A_g \text{ varilla} = F_y \text{ W12x35} * A_g \text{ W12x35}$$

$$A_g \text{ varilla} = \frac{F_y \text{ W12x35} * A_g \text{ W12x35}}{\phi * F_y \text{ varilla}}$$

A <sub>g</sub> varillas	61,53 cm <sup>2</sup>
-------------------------	-----------------------

## Revisión de soldadura

Posteriormente se revisa la soldadura propuesta para realizar la unión entre dichos elementos, para la misma se propone una longitud de soldadura de 15 cm con una garganta de 1,2 cm.



**Figura 24.** Detalle soldadura entre varillas y perfil W (Planos constructivos)

Los datos mostrados son resultado de la tabla J.2.4 del AISC donde se encuentran algunas limitaciones con respecto a los tamaños máximos y mínimos de la garganta de la soldadura.

Parte más gruesa conectada	2,54 cm
Parte más delgada conectada	0,76 cm
Tamaño mínimo	0,79 cm
tamaño máximo	2,38 cm

#### Resistencia de la soldadura

		Resistencia
Electrodo	E70	4921 kg/cm <sup>2</sup>

Fw	2952,60 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Fw	2214,45 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Rn	1878,93 kg/cm

#### Resistencia del metal base

Fy del metal	3500 kg/cm <sup>2</sup>
t	0,76 cm
$\phi$ Rn	1440,12 kg/cm

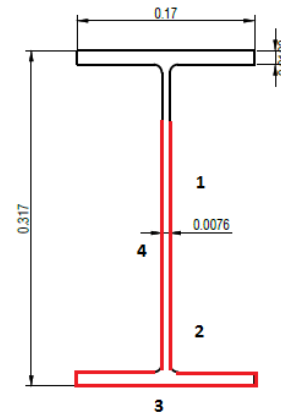
Resistencia que gobierna la unión	1440,12 kg/cm
-----------------------------------	---------------

Resistencia de la unión analizada	43204,17 kg
-----------------------------------	-------------

## Diseño de la unión entre el arrioste y la torre del puente

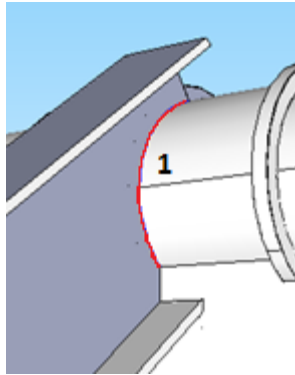
Esta unión es importante para lograr que las fuerzas se transmitan adecuadamente al arrioste, sin embargo en los planos constructivos no se muestra el detalle de la soldadura que se debe hacer. Como parte de este análisis se elabora el diseño de las soldaduras de la unión con el fin de que durante la obra el encargado de la soldadura tenga claro qué tipo de soldadura se debe realizar.

La unión entre estos dos elementos se realizará mediante soldadura. Debido a la diferencia de espesores de material que deben ser soldados, debe analizarse cada cordón de soldadura por aparte para finalmente obtener la resistencia total de la unión soldada. El procedimiento realizado se muestra a continuación:



**Figura 25.** Soldaduras diseñadas en la unión.

### Diseño de la soldadura N°1



**Figura 26.** Soldadura 1 de la unión entre arriestre y torre (Elaboración propia, SketchUp).

### Requerimientos tabla J.2.4 AISC

Parte más gruesa conectada	0,76 cm
Parte más delgada conectada	0,64 cm
Tamaño mínimo	0,48 cm
Tamaño máximo	0,60 cm

### Resistencia de la soldadura

	Resistencia
Electrodo E70	4921 kg/cm <sup>2</sup>

Fw	2952,60 Kg/cm <sup>2</sup>
φ Fw	2214,45 Kg/cm <sup>2</sup>
φ Rn	751,57 Kg/cm

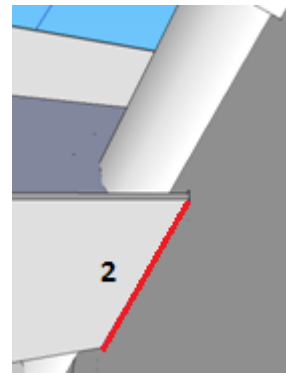
### Resistencia metal base

Fy del metal	3220 kg/cm <sup>2</sup>
t	0,63 cm
φ Rn	1104,09 kg/cm

Resistencia que gobierna la unión	751,57 kg/cm
-----------------------------------	--------------

Resistencia de la unión analizada	99208,53 kg
-----------------------------------	-------------

### Diseño de la soldadura N°2



**Figura 27.** Soldadura 2 de la unión entre arriestre y torre (Elaboración propia, SketchUp)

### Requerimientos tabla J.2.4 AISC

Parte más gruesa conectada	1,59 cm
Parte más delgada conectada	1,27 cm
Tamaño mínimo	0,64 cm
tamaño máximo	1,43 cm

### Resistencia de la soldadura

	Resistencia
Electrodo E70	4921 kg/cm <sup>2</sup>

Fw	2952,60 Kg/cm <sup>2</sup>
φ Fw	2214,45 Kg/cm <sup>2</sup>
φ Rn	1002,09 Kg/cm

### Resistencia metal base

Fy del metal	3500 kg/cm <sup>2</sup>
t	1,27 cm
φ Rn	2400,20 kg/cm

Resistencia que gobierna la unión	1002,09 kg/cm
-----------------------------------	---------------

Resistencia de la unión analizada	74155,87 kg
-----------------------------------	-------------

Diseño de la soldadura N°3

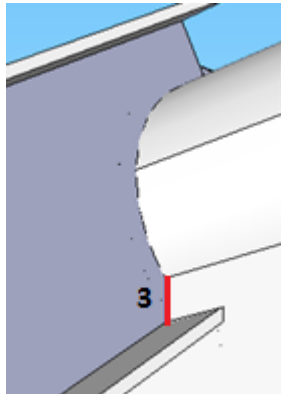


Figura 28. Soldadura 3 de la unión entre arrioste y torre (Elaboración propia, SketchUp)

Requerimientos tabla J.2.4 AISC

Parte más gruesa conectada	1,59 cm
Parte más delgada conectada	0,76 cm
Tamaño mínimo	0,64 cm
tamaño máximo	1,43 cm

Resistencia de la soldadura

	Resistencia
Electrodo E70	4921 kg/cm <sup>2</sup>

Fw	2952,60 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Fw	2214,45 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Rn	1002,09 kg/cm

Resistencia del metal base

Fy del metal	3500 kg/cm <sup>2</sup>
t	0,76 cm
$\phi$ Rn	1436,34 kg/cm

Resistencia que gobierna la unión	1002,09 kg/cm
-----------------------------------	---------------

Resistencia de la unión analizada	10021,06 kg
-----------------------------------	-------------

Diseño de la soldadura N°4

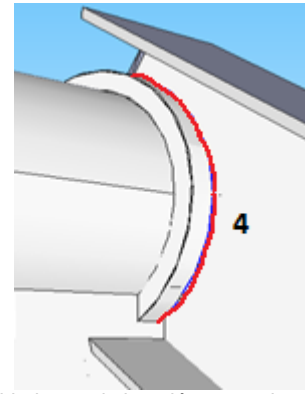


Figura 29. Soldadura 4 de la unión entre el anclaje y la torre (Elaboración propia, SketchUp)

Requerimientos tabla J.2.4 AISC

Parte más gruesa conectada	2,54 cm
Parte más delgada conectada	0,76 cm
Tamaño mínimo	0,79 cm
tamaño máximo	2,38 cm

Resistencia de la soldadura

	Resistencia
Electrodo E70	4921 kg/cm <sup>2</sup>

Fw	2952,60 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Fw	2214,45 kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ Rn	1409,19 kg/cm

Resistencia del metal base

Fy del metal	3500 kg/cm <sup>2</sup>
t	0,76 cm
$\phi$ Rn	1436,34 kg/cm

Resistencia que gobierna la unión	1409,19 kg/cm
-----------------------------------	---------------

Resistencia de la unión analizada	146558,05 kg
-----------------------------------	--------------

Luego de hacer el diseño de las cuatro soldaduras individualmente se procede a realizar la suma de las capacidades con el fin de obtener la capacidad total de la unión.

### Cuadro 1. Capacidad total de la unión soldada.

Conexión	Capacidad
1	99208,53 kg
2	74155,87 kg
3	10021,06 kg
4	146558,05 kg
TOTAL	329943,52 kg

<b>Capacidad unión</b>
329,94 t
<b>Capacidad requerida</b>
209,53 t

### Revisión de la longitud de desarrollo de las varillas del anclaje

Finalmente se revisa la longitud de desarrollo de las varillas que se encargan de transmitir las cargas del perfil W al anclaje de concreto.

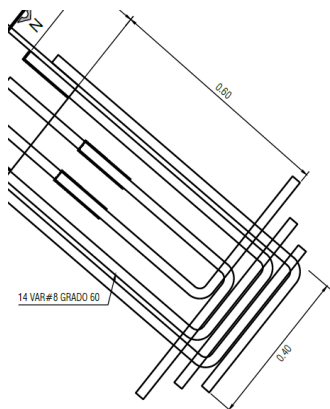


Figura 30. Detalle de la longitud de desarrollo (Planos constructivos, dimensión en m).

Primeramente se revisó con las especificaciones del Código Sísmico de Costa Rica 2010, sección 8.5

Normativa Nacional según CSCR	
8Φ	20,32 cm
15 cm	15,00 cm
lag	39,85 cm

	L. de desarrollo
Rige	39,85 cm

	12*db
Gancho	30,48 cm

Posteriormente se realiza el cálculo utilizando la normativa especificada por el ACI en la sección 12.5.2

Recubrimiento epóxico	No	1,00
Concreto liviano	No	1,00
Resistencia a la fluencia (Fy)	42,00 kg/mm <sup>2</sup>	

ldh	428,42 mm	42,84 cm
-----	-----------	----------

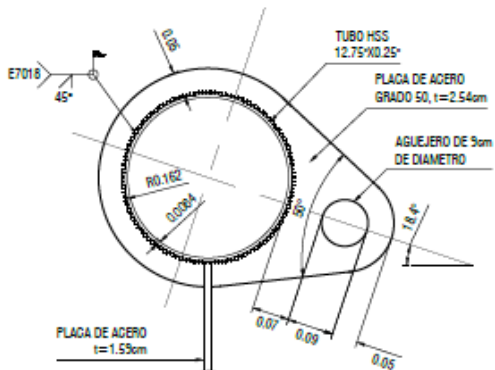
Factor según inciso 12.5.3	0,7
----------------------------	-----

ldh	29,99 cm
-----	----------

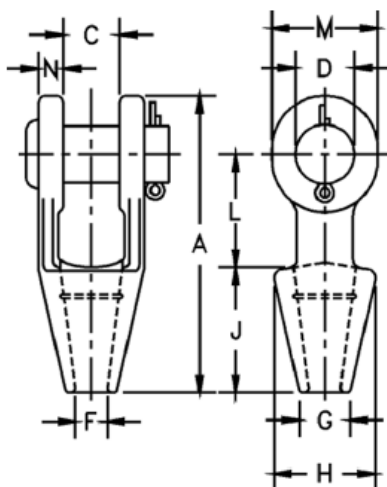
## Transición entre las torres y el cable

En este caso, para lograr una sujeción adecuada entre los cables y la torre se propone el uso de un elemento fabricado en taller junto con un accesorio brindado por un fabricante. Este sistema se debe utilizar porque a diferencia de un puente colgante típico, el cable principal del puente en estudio, no posee continuidad desde el anclaje. sino que se debe anclar desde las torres.

Seguidamente se muestran los detalles de los elementos mencionados, tanto de la placa utilizada para la sujeción al tubo de la torre como de la terminal de vaciado que se encarga de unir el cable con dicha placa.



**Figura 31.** Detalle del elemento fabricado en taller para realizar la unión. (Planos constructivos, dimensiones en metros).



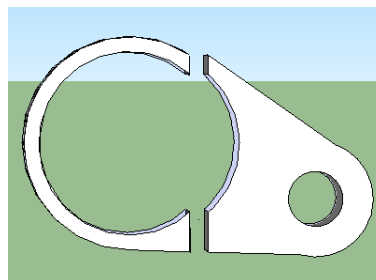
**Figura 32.** Accesorio utilizado para el anclaje del cable. (Detalles de proveedor, Manual "Terminales de vaciado abiertas Crosby")

## Miembro conectado por pasador

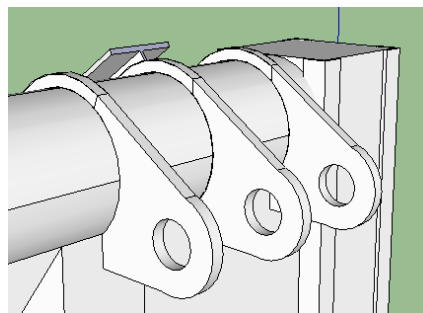
En el caso de este, consta de dos partes: la primera implica la fabricación del elemento y la segunda, el montaje del mismo en la obra. En el primer caso, para la elaboración de la pieza para sujetar el cable, se contará con el trabajo de un taller especializado en el corte de elementos metálicos por medio de plasma, para eso se utilizará una máquina que al introducirse las dimensiones y forma del elemento en un

programa, este genera un patrón en la placa de acero (espesor 2,54 cm) y posteriormente la misma máquina se encarga del corte.

En lo que respecta al montaje, dentro del documento presentado por parte de la empresa no se especifica dicha actividad, sin embargo en reuniones que se sostuvieron con los constructores, estos acordaron que la colocación de dichas piezas se realizaría mediante su corte, posteriormente ambas partes de este se colocarán en el tubo que se encuentra ya soldado en la torre, para luego soldar las partes que fueron cortadas.



**Figura 33.** Corte para realizar el montaje (Elaboración propia, SketchUp)



**Figura 34.** Detalle del elemento colocado en la torre (Elaboración propia, SketchUp)

En la figura 34 se muestra como deberían quedar las piezas colocadas después de realizar las soldaduras al tubo que se encuentra construido. Estos elementos, según lo especificado en planos, deben quedar con una inclinación de 38° lo cual deberá verificarse al momento del montaje.

Ya con los elementos en su posición será necesario colocar la terminal de vaciado abierta con ranura, este elemento es el encargado de generar la sujeción entre el cable y la placa diseñada. En la siguiente figura se muestra como debería quedar la unión terminada:



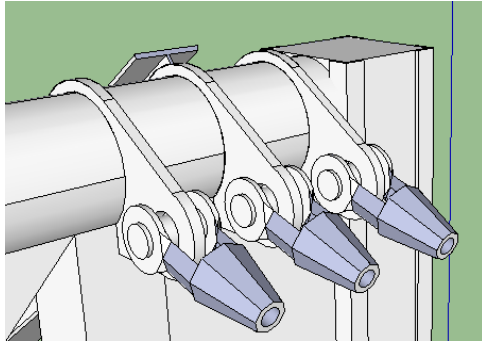


Figura 35. Detalle de la unión finaliza (Elaboración propia, SketchUp)

## Revisión de la capacidad

### Miembro conectado por pasador

Para realizar la transición entre el anclaje y el cable, se utiliza un miembro conectado por un pasador, en este se perfora un agujero en el miembro y en las partes a las que éste va a estar conectado, posteriormente se inserta un pasador a través del agujero. Para el diseño de este tipo de elementos se debe revisar la sección D5 del AISC. El elemento propuesto y el análisis del mismo se muestran a continuación:

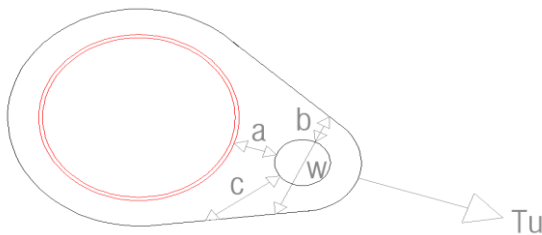


Figura 36. Nomenclatura de las dimensiones del elemento (Planos constructivos).

Propiedades del material usado para fabricar la pieza

Tipo	Fy		Fu	
Placa	50 Ksi	3500 Kg/cm <sup>2</sup>	75 Ksi	5250 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Datos brindados por el diseñador.

Propiedades geométricas de la pieza utilizada

W	t	d	a	c	b
30 cm	2,54 cm	9 cm	7 cm	14,8 cm	5,5 cm

Fuente: Planos constructivos del proyecto.

Requerimientos según análisis estructural	
Tensión última	52535,00 kg
Aplastamiento	49660,00 kg

Fuente: Datos del diseñador.

Requerimientos dimensionales según sección D5.2 AISC

$$b_{eff} = 2t + 1.6002 \text{ cm} \quad 6,68 \text{ cm}$$

$$a \geq 1.33 b_{eff} \quad 8,88 \text{ cm}$$

$$w \geq 2b_{eff} + d \quad 22,36 \text{ cm}$$

$$c \geq a \quad \text{OK}$$

Posteriormente, es necesario revisar cuatro condiciones de falla especificadas en la sección D5 del AISC, estos son: tensión en el área neta efectiva, cortante en el área efectiva, aplastamiento y tensión en la sección total; seguidamente se muestran los resultados de este análisis.

Tensión en el área neta efectiva

Pn	$\phi Pn$	$\phi Pn > Tu$
178155,60 kg	133616,7 kg	OK

Cortante en el área efectiva

Asf	Pn	$\phi Pn$	$\phi Pn > Tu$
58,4 cm <sup>2</sup>	184023,00 kg	138017,25 kg	OK

## Aplastamiento

Apb	Pn	$\phi Pn$	$\phi Pn > Tu$
22,9 cm <sup>2</sup>	144635,22 kg	108476,42 kg	OK

## Tensión en la sección total

Ag	Pn	$\phi Pn$	$\phi Pn > Tu$
76,2 cm <sup>2</sup>	267843,00 kg	241058,70 kg	OK

## Terminal de vaciado abierto

En el caso de estos elementos basta con verificar que los datos brindados por el proveedor nos ayuden a comprobar que la pieza cumple con los requerimientos necesarios. En el anexo 3 de este trabajo se adjunta la tabla de la empresa Crosby sobre las terminales de vaciado abiertas, al revisar la tabla se muestra que este accesorio posee una carga de ruptura de 170 toneladas mientras que la tensión máxima determinada en el análisis del elemento es de 52,5 toneladas.

# Aspectos constructivos

## Comparación entre las propuestas de montaje

Un proyecto de construcción de esta envergadura evoluciona conforme este se va desarrollando, por lo que durante este proceso pueden existir cambios que afecten profundamente la ejecución de un proyecto. En el caso del proyecto analizado, inicialmente se planteó la opción de realizar el montaje de la cercha del puente por

medio de dos grúas tipo camión, colocadas en el puente vehicular adjunto a la obra, sin embargo, por algunos motivos mencionados a continuación fue necesario buscar otra alternativa de montaje.

En este caso surge la idea de realizar el montaje utilizando un sistema de cables secundarios independientes a los cables principales del puente, que luego del montaje serán retirados, estos cables servirán para que una "grúa tipo teleférico" se encargue de llevar las piezas desde un extremo hasta la posición final, estas grúas deberán diseñarse para que posean la capacidad de elevar y bajar las piezas así como de desplazarse a lo largo de la luz del puente.

La idea de esta sección es mostrar cuáles son los pro y los contras que poseen las dos propuestas y señalar si la opción que se desea implementar es la más adecuada.

## Propuesta 1: Utilizar grúas tipo camión

Debido a que esta propuesta fue la primera en considerarse, ya existía un documento preparado por la empresa Fernández Vaglio Constructora, llamado: "Proceso constructivo y montaje de puente sobre río Virilla", en donde se explica cómo se procedería para realizar el montaje. Sin embargo a continuación se detalla una serie de debilidades encontradas al revisar dicho documento:

- Se especifica la colocación de grúas GROVE-GMK 2035 y se realiza una explicación de la colocación de la misma en el puente, sin embargo no se presentan esquemas donde se observen las maniobras que realizará la grúa. Además, se deja de lado el aspecto relacionado con los cables de alta tensión del sector de Santa Ana, por lo que no se verifica la existencia de inconvenientes con la grúa que se pretende utilizar.
- Es fundamental para un izaje de esta magnitud que se cuente con un plan de izaje de cargas. La preparación de plan izaje de ingeniería deberá poner en relieve toda inquietud a ser abordada durante el

procedimiento de instalación del proyecto<sup>25</sup>, esto asegura que las maniobras que se deben realizar serán de manera segura ya que se pretende contemplar factores como: capacidad bruta de la grúa, tipo de eslingas y posición de las mismas, posicionamiento de los estabilizadores de la grúa, capacitación del operador y la cuadrilla, posible efecto del viento en la carga, diagrama de izaje donde indiquen los movimientos de carga y descarga, y peligrosidad eléctrica.

- En el documento presentado no se muestran los cálculos correspondientes al peso de la estructura que se debe levantar, por lo tanto no se verifica que la afirmación de emplear una grúa de 30 Ton cumpla con los requerimientos de carga. Además no existen cálculos ni detalles del tipo de eslingas a utilizar, su colocación en la cercha, así como de los accesorios necesarios para unir las eslingas con la estructura y la grúa.
- Además, el documento no contempla los efectos de las deflexiones en el cable antes y después de realizar el montaje, esto porque según la teoría de puentes colgantes, para la construcción del mismo se debe considerar el posicionamiento del cable principal antes, durante y después del montaje; ya que inicialmente la flecha debe ser tal que al montar la estructura esta aumente y cuando se ponga en servicio alcance la flecha final deseada.
- Por otra parte es necesario que se muestre el cálculo donde se evalúen los esfuerzos producidos en la cercha a la hora de realizar el izaje, esto porque se debe verificar que la estructura no queda sometida a esfuerzos para los cuales no fue diseñada.

Seguidamente se mostrarán cuatro aspectos importantes, los cuales se analizarán desde el punto de vista de ambas propuestas para determinar la influencia del proceso sobre ellos.

## Influencia sobre el tránsito vehicular

---

<sup>25</sup> IMCA, directrices para operaciones de izaje.

Para ejecutar este tipo de montaje será necesario colocar al menos dos grúas tipo camión sobre la superficie de ruedo del puente sobre el río Virilla de la ruta 147, esta ruta es la principal vía de comunicación entre los sectores de Santa Ana y San Rafael de Alajuela. Debido a que se colocarán las cerchas sobre el puente, además de las grúas, el cierre de la vía debe ser total y no existiría la posibilidad de regular el tránsito vehicular.

Se debe tomar en cuenta, además, que se cerrará la vía durante la ejecución de las dos actividades principales, las cuales son: el montaje del cable y el montaje de las cerchas, por lo que el cierre de la vía deberá ser de varias semanas, además, debido a las condiciones del sitio no es recomendable realizar trabajos en la noche, pues cerrar las vías durante estas horas podría aumentar los riesgos durante el montaje.

## Movimientos cerca de los cables eléctricos

Uno de los principales problemas que presenta este tipo de montaje es que el brazo de la grúa debe maniobrar cerca de los cables de alta tensión, esto en el lado de Santa Ana. Documentos relacionados con este tema señalan que para cables de hasta 1000Kv la distancia mínima entre el brazo de la grúa y el cable debe ser al menos 13m (ver anexo 2). En caso de que no se cumpla esto la mejor opción es cortar el flujo de corriente mientras se realicen los trabajos, sin embargo debido a la importancia de estas líneas es imposible realizar el corte.

## Posicionamiento de las cerchas entre los cables principales

Es importante analizar este factor, puesto que se trata de un detalle que puede pasar desapercibido, pero al momento del montaje puede generar inconvenientes. En la figura siguiente se muestra un esquema de la colocación de la grúa y el posicionamiento de la cercha para ser sujeta a las péndolas.

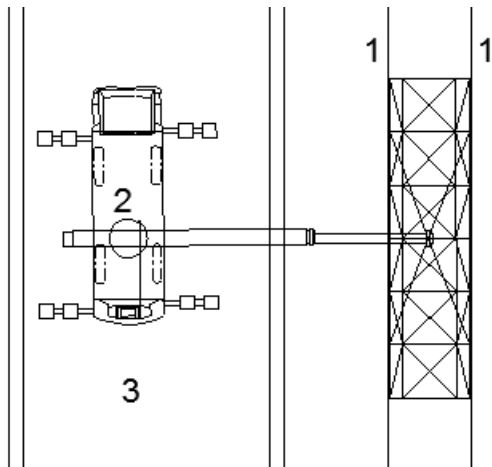


Figura 37. Posicionamiento de la sección de cercha entre los cables principales. (Elaboración propia).

En la figura anterior el 1 corresponde a los cables principales utilizados para el montaje del puente, el 2 corresponde a la sección de cercha de 12 m y por último el 3 es la superficie de ruedo. El principal problema que se presenta es la colocación de la cercha, esto porque la distancia que existe entre los cables principales del puente es de 3,10 m mientras que la cercha tiene un ancho de 3 m lo que deja un espacio de 5mm a cada lado de la cercha para hacerla pasar entre los cables. También se debe considerar que la cercha posee elementos que se utilizarán para unir las péndolas con la estructura, dichos elementos sobresalen de la estructura principal lo que provoca que se conviertan en obstáculos para realizar la maniobra.

Esta maniobra debe considerar varios factores que la complican, entre ellos que debido al peso de los cables y la altura a la que se trabaja resultaría muy difícil tratar de separar los cables para hacer espacio. Además se debe tomar en cuenta que en la zona la velocidad del viento es considerable por ende la sección izada se desplazaría ya sea adelante o a atrás, aunque el desplazamiento fuera poco, sería suficiente para evitar que la cercha pasara en medio de los cables. Por otra parte, debido a las condiciones del sitio no se podrían colocar elementos para que los operarios ayuden a mantener la cercha en posición o solo se podría controlar del lado de la superficie de ruedo, mientras que del lado del cañón no es posible.

## Procedimiento de montaje de las cerchas

Para la ejecución del procedimiento analizado es importante que tanto la grúa como las cerchas se coloquen en la superficie de ruedo del puente, por ende el espacio para realizar las maniobras se limita al ancho del puente. Sabiendo esto la primer limitante radica en que tanto la grúa como las cerchas se deberían colocar paralelas al puente, en el caso de la cercha cada sección mide 12 m mientras que el ancho de calle es de 9,3 m por lo que la cercha no se podría colocar perpendicular a la superficie de ruedo. Por otro lado, en el caso de la grúa el espacio para girar es muy poco y el camión no podría quedar en forma perpendicular, sabiendo esto se presenta un esquema de la maniobra que se debería realizar.

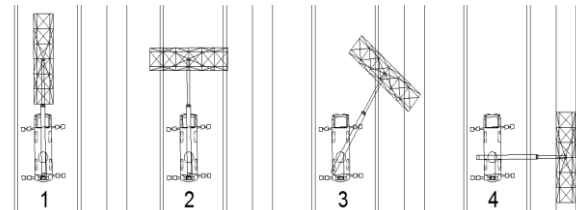


Figura 38. Proceso de montaje de cercha por medio de grúas tipo camión. (Elaboración propia)

Como podemos ver en la figura anterior, al colocar la cercha en forma paralela, esta se debe izar y luego mediante otro sistema se debe colocar perpendicular al puente para que posteriormente la grúa gire el brazo y lo ajuste y así quedar en la posición deseada. Este procedimiento requiere el cierre total de la vía así como personal calificado con experiencia en el izaje de cargas.

## Propuesta 2: Utilizar cables secundarios y una “grúa tipo teleférico”

Como se mencionó, este tipo de montaje consiste en la colocación de cables secundarios que se encargarán de servir como “rieles” para que una grúa similar a un teleférico pueda llevar las piezas desde los extremos hasta el lugar de colocación. Será necesario añadir un elemento a las torres del puente con el fin de que los cables

secundarios queden por encima de los cables principales, además la separación entre ambos debe ser menor que la separación entre los cables principales, esto para que no exista interferencia a la hora de realizar las maniobras.

Seguidamente se analizarán los puntos mencionados en la otra propuesta de montaje, con el fin de realizar una comparación y determinar las ventajas y desventajas de ambos procedimientos.

## Influencia sobre el tránsito vehicular

Este tipo de montaje se realizará en la zona donde se encuentran las torres del puente en construcción ubicadas en ambos márgenes del cañón. El acceso a la zona ubicada en el sector de Santa Ana se realiza por medio de una calle de lastre propiedad de la CNFL, por lo que el acceso de personas ajenas a la empresa se encuentra prohibido. Debido a esta condición el flujo de vehículos de la ruta 147 no se verá afectado por los trabajos, en este caso la única medida que se debe tomar en cuenta es una buena señalización indicando que existen trabajos en la zona y salida de vehículos pesados.

Por otro lado, el acceso del lado de San Rafael de Alajuela se da por medio de una zona ubicada al costado del puente, en este caso la ruta se verá afectada, en los momentos cuando se deba realizar la colocación de la cercha en el borde del cañón para luego montarlas, pero este movimiento no tardaría mucho tiempo por lo que el cierre sería temporal.

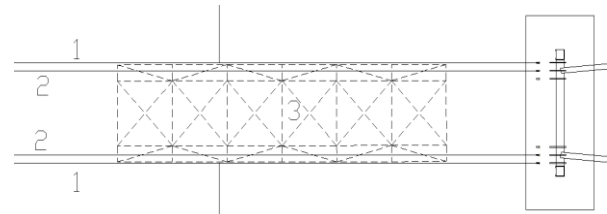
## Movimientos cerca de los cables eléctricos

Para implementar este sistema es necesario aumentar el tamaño de las torres, con el fin de que los cables secundarios queden por encima de los cables principales. Este añadido no será en tal magnitud que pueda provocar problemas con las líneas eléctricas. Uno de los beneficios de este sistema radica en que las maniobras a realizar se ejecutan de forma mecánica por medio de controladores y los trabajadores no deberán

estar ubicados en forma directa dentro del área de riesgo.

## Posicionamiento de las cerchas entre los cables principales

Para que este sistema de cables secundarios que se pretende utilizar tenga un buen funcionamiento es necesario que los cables secundarios se ubiquen a una distancia adecuada de los cables principales con el fin de que no se provoque ningún contacto entre ellos que pueda provocar el mal funcionamiento del sistema. En el siguiente esquema se muestra la posible colocación de la cercha para realizar el montaje.



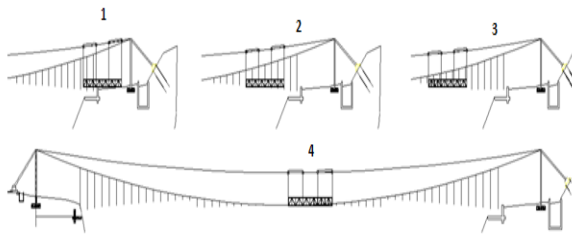
**Figura 39.** Posicionamiento de la cercha entre los cables principales (Elaboración propia).

En el esquema anterior el 1 representa los cables principales del puente, mientras que el 2 se trata de los cables secundarios utilizados solamente para el montaje, los cuales serán retirados posteriormente y el número 3 representa la cercha colocada para realizar el montaje. Es importante mencionar que la cercha se ubica por debajo de los cables antes citados por lo que únicamente se debe levantar y colocar en posición, esto se realizará por medio de una grúa especial montada sobre los cables secundarios que permitirá no solo realizar movimientos verticales de la sección, sino que además tendrá la capacidad de desplazarse horizontalmente a través de la luz del puente.

En lo que respecta al posible movimiento de la cercha debido al viento cabe mencionar que esta será montada sin el tubo, por lo que se disminuye en gran medida el área de afectación del viento. Además la cercha fue diseñada con el fin de que los movimientos laterales provocados por el viento no causen grandes desplazamientos.

## Procedimiento de montaje de las cerchas

Este proceso se realizará por medio del sistema ya explicado. Inicialmente la sección de cercha será colocada en el borde del cañón y se posicionará para que la "grúa teleférico" pueda sujetar la pieza y transportarla. Según los planos brindados por el AyA, en el sector de San Ana se posee un espacio entre torre y borde de aproximadamente 14m por lo que es posible colocar la sección de cercha que mide 12m, mientras que en el lado de San Rafael se cuenta con un espacio de 13m lo que también es adecuado, sin embargo en este sector puede que existan dificultades con la topografía, en caso de que esto afecte se usará una grúa colocada en el puente vehicular para posicionar la cercha. Seguidamente se muestra un esquema que indica el procedimiento descrito anteriormente.



**Figura 40.** Proceso de montaje utilizando cables secundarios y "grúa teleférico". (Elaboración propia)

En la imagen 1 se observa el posicionamiento de la cercha previa a que la grúa comience el desplazamiento. En la imagen 3 y 4 se muestra el desplazamiento que debe realizar la grúa para llevar el cable a su posición. Ya cuando la sección de cercha se ubique en el lugar donde le corresponde se bajará o subirá según la sección que se esté montando, posterior a esto la estructura se asegura a las péndolas que están previamente colocadas y sujetas al cable principal, de esta forma finaliza el proceso, luego la grúa regresa al borde, sujeta otra sección y repite el procedimiento.

## Cuadro 2. Resumen de comparación entre las propuestas para el montaje.

Punto de análisis	Propuesta 1	Propuesta 2
Influencia sobre el tránsito vehicular	Tránsito vehicular severamente afectado por cierres totales	Tránsito vehicular afectado de forma moderada por cierres temporales.
Movimiento cerca de cables eléctricos	Riesgo alto de electrocución por maniobras de la maquinaria.	Riesgo alto de electrocución en primeras etapas del montaje.
Posicionamiento de las cerchas entre los cables principales	El espacio para pasar las cerchas entre los cables principales complica el movimiento.	Debido al sistema utilizado este factor no afecta el proceso.
Procedimiento de montaje de las cerchas	Utilización de grúas tipo camión y maniobra desde el puente vehicular adjunto.	Sistema de cables secundarios y "grúa teleférico".

Fuente: elaboración propia.

## Análisis flechas durante montaje

Para este análisis se utilizó el programa de análisis estructural SAP 2000 V14 de la empresa Computers and structures INC, primeramente se determinaron las cargas por línea para el análisis del cable. Dichas cargas corresponden a la distribución por medio de áreas tributarias hacia las secciones donde se encuentran los elementos que sujetan las péndolas. En este las cargas de suspensión y temporales fueron definidas por el diseñador.

### Cuadro 1. Carga permanente por línea.

Cercha	218,44 kg/m
Tubo	106,00 kg/m
Agua	318,00 kg/m
Cable	6,20 kg/m

Suspensión	0,80 kg/m
Carga temporal	20,00 kg/m

Cada línea repartirá la carga mediante tres cables, según lo que es necesario que estas sean divididas por el número de cables y así obtener la carga para el análisis de uno solo. Como los cables deben tener la misma flecha su comportamiento será el mismo, por lo que el análisis de un solo cable es suficiente.

### Cuadro 2. Cargas para un solo cable.

Cercha	72,81 kg/m
Tubo	35,33 kg/m
Agua	106,00 kg/m
Cable	6,20 kg/m
Suspensión	0,80 kg/m
C. temporal	6,67 kg/m
<b>TOTAL</b>	<b>221,61 kg/m</b>

Este peso de 221,61 Kg/m corresponde a la carga en el cable cuando el puente ya esté en servicio, adicionalmente se analizan tres casos más, en cada uno se utilizaron diferentes cargas las cuales son:

### Cuadro 3. Carga condición de la cercha sin tubo.

Cercha	72,81 kg/m
Suspensión	0,80 kg/m
C. temporal	6,67 kg/m
<b>TOTAL</b>	<b>80,28 kg/m</b>

### Cuadro 4. Carga condición de la cercha con tubo sin agua.

Cercha	72,81 kg/m
Tubo	35,33 kg/m
Suspensión	0,80 kg/m
C. temporal	6,67 kg/m
<b>TOTAL</b>	<b>115,61 kg/m</b>

Luego de esto se elabora un modelo del cable en el SAP2000 V14. En el apéndice 1 de este trabajo se muestran los resultados de los modelos realizados con el fin de determinar el aumento de la flecha para las diferentes etapas del proceso constructivo. Los principales resultados de este análisis se muestran en el siguiente cuadro:

### Cuadro 5. Cambio de flecha para las distintas condiciones.

Condición	Flecha medida desde soporte de los cables	Aumento de flecha respecto anterior
1	9,699 m	
2	10,890 m	1,191 m
3	11,255 m	0,365 m
4	12,196 m	0,941 m

En el primer caso (peso propio del cable) se analiza la flecha inicial que tomará el cable únicamente producto del peso propio de este, (el cual es definido inicialmente por el diseñador), posteriormente se realiza el análisis considerando la carga de la cercha pero sin el tubo de 900mm, luego la condición al colocar el tubo y por último la flecha al poner en servicio el puente. En el apéndice 2 se presenta un gráfico con los resultados obtenidos en el cuadro anterior.

El aumento en la flecha provocará también un incremento en la longitud del cable, la cual debe ser revisada para que cuando se realice el corte del mismo, esta sea tomada en cuenta. En el cuadro siguiente se muestra el aumento de esta longitud:

### Cuadro 6. Aumento de longitud del cable debido al cambio de flecha.

Condición de montaje	Longitud del cable
Peso propio del cable	139,51 m
Cable + cercha - tubo	139,97 m
Cable + cercha + tubo vacío	140,12 m
Cable + cercha + tubo lleno	140,53 m

# Propuesta de montaje del puente

Antes de realizar el análisis de estos casos, se debe señalar que, independientemente del método elegido, el montaje de la estructura solo se efectuará con dos de los seis cables utilizando únicamente un cable por línea. Esto debido a motivos constructivos ya que el acomodo de los otros cuatro cables debe realizarse cuando ya la estructura del puente esté montada.

Además, cabe mencionar que AyA indica que el montaje se deberá hacer de tal manera que el ajuste final se realice en los bordes del cañón, lugar donde se apoya la cercha. Esto porque se considera que ejecutar la maniobra de ajuste en el centro de la luz del puente es una tarea que requiere mucha precisión, además de la peligrosidad que conllevaría realizar dicho ajuste en el "aire".

## Montaje de la cercha extremo a extremo

Este tipo de montaje consiste en colocar las cerchas en el cable principal comenzando desde el extremo del cañón de la zona de Santa Ana y avanzando en tramos de doce metros hasta concluir en el extremo opuesto, ubicado en la zona de San Rafael de Alajuela. Para analizar las implicaciones de este procedimiento tanto en el montaje como en la tensión del cable se elaboró un modelo en el SAP2000 V14 con el fin de simular la colocación gradual de las cargas. Tanto en el análisis de esta propuesta como en la que se mostrará posteriormente se utilizaron las siguientes cargas:

### Cuadro 7. Cargas presentes en un cable

Cercha	218,44 kg/m
Tubo	106,00 kg/m
Agua	318,00 kg/m
Cable	6,20 kg/m
Suspensión	0,80 kg/m

Carga temporal	20,00 kg/m
----------------	------------

Este análisis únicamente considera la capacidad de un solo cable, ya que solo se usarán dos cables (uno por lado) para el montaje del puente. Por esta razón las cargas utilizadas en el modelo de cada cable son producto del análisis de áreas tributarias para dichos elementos. Seguidamente se muestra la secuencia con la que se cargará el cable, en donde las cargas distribuidas corresponden a las secciones de cercha que se colgarán del cable principal por medio de péndolas colocadas a una distancia equidistante unas de otras.

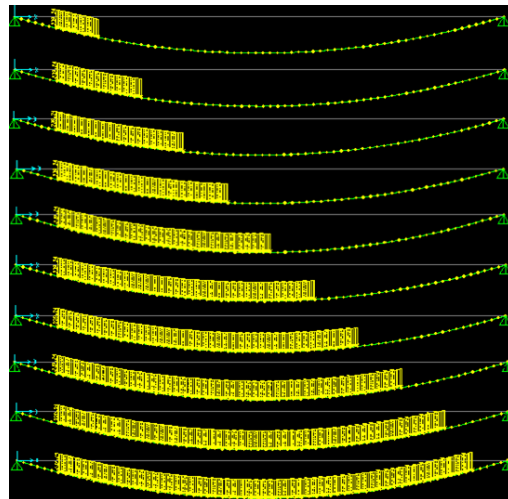


Figura 41. Secuencia como se cargará el cable durante el montaje (Elaboración propia, SAP 2000).

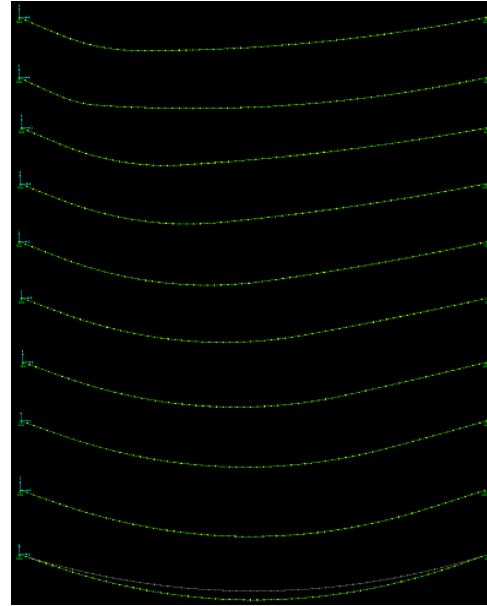
Luego de analizar cada una de las condiciones de carga presentadas en el esquema anterior, se obtuvieron los resultados correspondientes a la tensión máxima, esto con el fin de verificar que el montaje se puede realizar con únicamente dos cables. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla que se muestra a continuación:



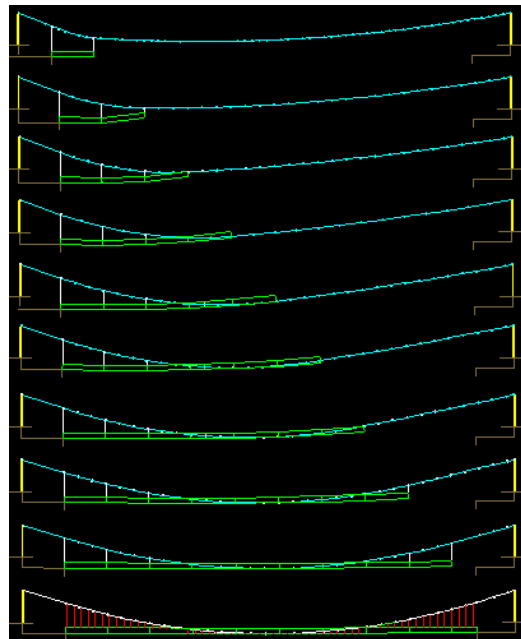
**Cuadro 8. Resultados del análisis SAP 2000 con respecto a la tensión máxima del cable.**

Tramo	tensión máxima	
1	7349,07 kg	7,35 t
2	13569,95 kg	13,57 t
3	19883,62 kg	19,88 t
4	25994,39 kg	25,99 t
5	31717,35 kg	31,72 t
6	36904,42 kg	36,90 t
7	41416,35 kg	41,42 t
8	45104,23 kg	45,10 t
9	47794,49 kg	47,79 t
10	49052,62 kg	49,05 t

Uno de los resultados más importantes de este análisis es conocer cómo se deforma el cable conforme se aplican las cargas antes mostradas y ver qué comportamiento tendrá la estructura durante el montaje, ya que este factor puede afectar al momento de realizar la unión entre dos secciones de la cercha. En la primera figura se muestra cómo se va deformando el cable mientras se le aplican las cargas antes mencionadas. Seguidamente, en la segunda figura, se muestra el comportamiento que tendría la cercha durante el montaje conforme suceda la deformación del cable.



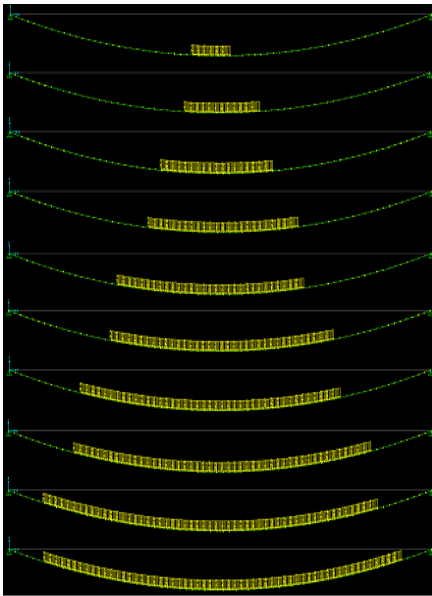
**Figura 42.** Deformación del cable durante el proceso de montaje de las cerchas. (Elaboración propia, SAP 2000)



**Figura 43.** Comportamiento de la estructura conforme se da el proceso de montaje. (Elaboración propia, Autocad)

## Montaje de cercha centro hacia los extremos

Esta propuesta de montaje consiste en colocar las cerchas en tramos de doce metros partiendo desde el centro del claro de puente y continuando hacia los extremos. La colocación se realizaría en forma simétrica intentando compensar la deformación del cable, el esquema de la misma se muestra a continuación:



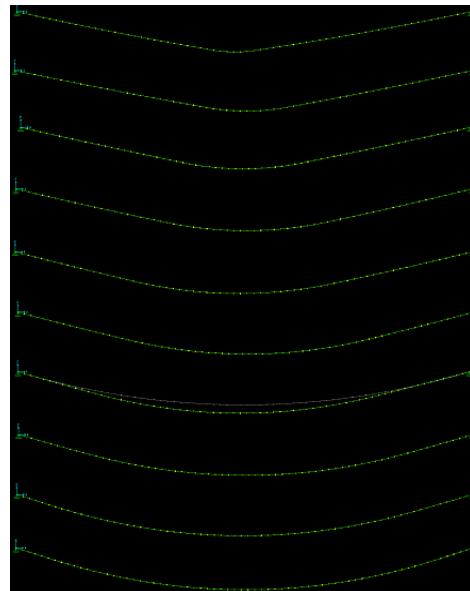
**Figura 44.** Secuencia como se cargará el cable durante el montaje (Elaboración propia, SAP 2000).

Seguido al análisis, igual que en el caso anterior, se obtuvieron las tensiones máximas con el fin de determinar la factibilidad de la propuesta, en este caso igualmente se utilizaron las cargas mencionadas lo único que cambia es la forma como se va cargando el cable.

## Cuadro 9. Resultados del análisis SAP 2000 con respecto a la tensión máxima del cable.

Tramo	tensión máxima	
1	10282,34 kg	10,28 t
2	17458,85 kg	17,46 t
3	23769,75 kg	23,77 t
4	29339,32 kg	29,34 t
5	34252,21 kg	34,25 t
6	38505,42 kg	38,51 t
7	42202,46 kg	42,20 t
8	45245,06 kg	45,25 t
9	47768,22 kg	47,77 t
10	49026,06 kg	49,03 t

Finalmente, con el fin de hacer una comparación con el método presentado anteriormente, se obtuvo la deformada del cable en cada uno de los estados de carga mostrados en la figura anterior. Además se realizó el mismo procedimiento ya explicado y se procede a realizar un esquema donde se muestre el comportamiento de la cercha ante las diferentes etapas del montaje. Ambas figuras se muestran a continuación:



**Figura 45.** Deformación del cable durante el proceso de montaje de las cerchas. (Elaboración propia, SAP 2000).

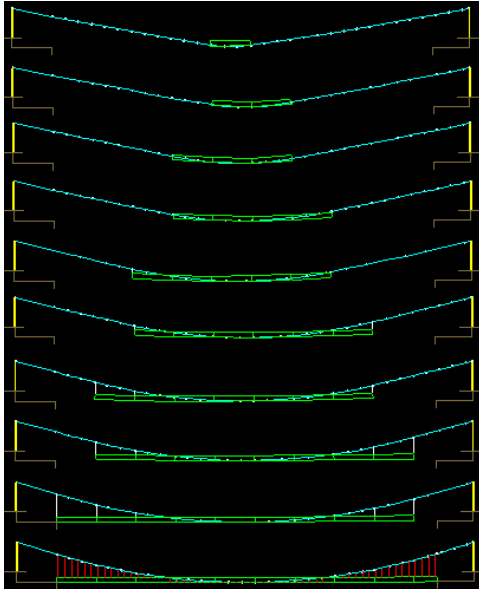


Figura 46. Comportamiento de la estructura conforme se da el proceso de montaje. (Elaboración propia, Autocad).

# Seguridad en la construcción

## Evaluación del plan de seguridad

La seguridad durante la ejecución de una obra es un tema que se debe tratar con el mayor cuidado posible, ya que una buena planificación puede reducir enormemente la presencia de accidentes durante la construcción. Es importante mencionar que todo plan de seguridad es propio de la obra a ejecutar y no se debe tomar como un documento estándar para cualquier obra, esto porque cada obra posee actividades diferentes en ambientes diferentes que conllevan un estudio particular. En el caso del plan de seguridad del proyecto de montaje del puente para tubería sobre el río Virilla, la empresa constructora detalla en una de las secciones del documento "Proceso constructivo y montaje de puente sobre el río

Virilla", el plan de seguridad establecido para esta obra.

Dentro de este apartado se menciona que el mismo fue elaborado con el fin de desarrollar los conceptos de identificación, evaluación y planificación de los riesgos. Sin embargo, luego de analizar el documento se encontraron algunas debilidades en las áreas antes mencionadas, seguidamente se muestran algunas de ellas:

### Identificación de riesgo

El primer paso a seguir para reconocer de manera adecuada los riesgos a los que están expuestos los trabajadores, consiste en la recolección de información relevante, para esto se debe tener claro la lista de actividades y recursos, pues con ella se identificarán las zonas de trabajo donde se desarrolla cada actividad, así como los posibles peligros a los que se está expuesto; es necesario que para este paso se tenga pleno conocimiento del sitio, ya que se deben considerar factores ambientales y limitantes geométricas. Se debe recurrir a recursos como: planos constructivos, levantamientos topográficos de la zona de trabajo, estudios meteorológicos, estudios del comportamiento del tráfico, etc.

En este caso la empresa constructora no muestra un listado de actividades y recursos propios de la obra y el alcance de la identificación de riesgos se limitan a cinco actividades principales, además se presenta una tabla donde se muestra la detección de riesgos más frecuentes, lo que nos hace pensar que se utiliza un procedimiento estandarizado para la atención de este tema.

### Evaluación de los riesgos

En el plan de seguridad planteado para la obra, se muestra la utilización de una matriz de riesgos que en este caso es una buena herramienta para lograr el objetivo esperado. Sin embargo una matriz de riesgos es consecuencia de una buena identificación de riesgos, ya que solo cuando se presenta un estudio adecuado de los peligros es posible evaluarlos de buena manera.

El principal inconveniente encontrado en la matriz de riesgos que presentó la empresa constructora, radica en la falta de información respecto a las actividades a realizar, ya que el desglose de las mismas se limita a unas cuantas y debido a la magnitud de esta obra, la matriz de riesgos debería ser más extensa para no dejar de lado ninguna de las actividades propias de esta obra.

## Planificación de riesgos

La planificación de riesgos busca generar recomendaciones y sistemas de protección para evitar posibles accidentes, sin embargo este debe ser el resultado de una evaluación adecuada de los riesgos, con el fin de detectar los puntos más críticos y de esta forma proponer las medidas respectivas. Por esta razón, la mala identificación de riesgos y su evaluación poco detallada provoca que las medidas preventivas solamente cubran algunos aspectos, por lo que se deja de lado algunos factores de riesgo importantes que podrían provocar accidentes.

Aparte de la matriz de riesgo, en el documento presentado por la empresa constructora, se mencionan algunas medidas preventivas, sin embargo en el caso de ciertas actividades estas tienen un carácter general y se aplican básicamente en cualquier obra, lo que pone en evidencia la necesidad de un análisis más específico.

## Caso de la familia que habita debajo del puente

En la zona de trabajo ubicada en el sector de San Rafael de Alajuela existe el caso de una familia que posee su vivienda en la parte inferior del puente vehicular y se extiende a un sector muy cerca de la zona de trabajo. Debido a la magnitud de los elementos con los que se trabajará su permanencia constituye un potencial peligro; tanto para los inquilinos, como para los trabajadores. Durante la construcción de los anclajes y el montaje de las torres la

permanencia de esta familia no provocó mayor inconveniente, debido a que el espacio para las maniobras era suficiente, sin embargo, para la próxima etapa del proyecto tanto los anclajes como la torre han provocado una disminución del espacio, lo que podría causar inconvenientes con el movimiento de los elementos y la maquinaria.

Por parte del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados se han buscado algunas soluciones en coordinación con otros entes gubernamentales para tratar de solventar este problema. Se habló con trabajadoras sociales del INVU de una posible reubicación, pero esta opción tomaría mucho tiempo y las posibilidades de aprobación son bajas. Además se trató de desalojar a la familia, pero los intentos tuvieron poco éxito.

Fundamentalmente se desea proponer soluciones que ayuden a preservar la integridad de las personas que viven debajo del puente. El lapso propuesto para el montaje de la estructura es de aproximadamente 38 días, sin embargo en las primeras etapas las actividades no comprometen la integridad de la familia, por lo que el tiempo de afectación directa se puede reducir a unos 30 días. Finalmente se muestran algunas de las principales limitaciones que se deben analizar antes de proponer alguna solución a este inconveniente:

- Se debe tratar de salvaguardar la integridad de las personas y la vivienda.
- En caso de que las personas se mantengan en el sitio se debe mantener una zona que puedan salir, sin correr riesgos debidos a la construcción.
- No se les debe quitar los servicios básicos con los que cuenta la familia en este momento.
- Debido a la situación económica de las personas que habitan la casa, es poco probable pedir que desalojen temporalmente.

En el anexo 4 se muestra la imagen del sitio en estudio en donde se pueden observar las dos viviendas ubicadas en la zona, en este caso solamente se propondrán soluciones para la casa ubicada debajo del puente puesto que la otra estructura se encuentra deshabitada y no existe inconveniente con una posible demolición.

# Análisis de los resultados

En el análisis del plan de construcción del puente para tubería sobre el río Virilla, se abordaron algunos de los aspectos constructivos más relevantes con el fin de crear un panorama más claro de las actividades que se realizarán.

## Diseño de sitio

Debido a la falta de esta información tan relevante para garantizar el éxito del proyecto, se enumerarán algunas de las principales limitaciones que posee el sitio de trabajo; esto con el fin de elaborar una propuesta de diseño de sitio que se acople a las necesidades y restricciones propias de la zona donde se construirán las obras.

### Análisis y diseño de sitio zona de Santa Ana

Antes de iniciar con el diseño del sitio se deben enumerar primeramente enumerar las principales limitaciones que se observan en la zona, para posteriormente, brindar recomendaciones que ayuden a agilizar el flujo de trabajo. Entre las principales limitaciones están:

1. Cercanía de las torres del puente con los cables eléctricos de alta tensión: en otra zona del río existe una represa hidroeléctrica propiedad de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Los cables de transmisión pasan por encima de la torre a unos 7m aproximadamente. Esta condición limita la utilización de grúas que posean brazos muy largos debido al riesgo de electrocución que hay en la zona, además los trabajos que se realicen en la torre deben hacerse con sumo cuidado y bajo estricta supervisión.
2. Presencia de un canal que transporta agua: como se mencionó, uno de los canales que van desde el embalse hasta la casa de maquinas de la represa pasa por la zona de trabajo entre las torres y los anclajes de la mismas. Este canal posee aproximadamente 12m de profundidad y unos 3m de ancho por lo que es fundamental tomar previsiones para evitar accidentes.
3. Distancia al borde del cañón: la distancia efectiva para realizar los trabajos consta fundamentalmente del ancho de calle (calle de lastre) y un espaldón. La calle posee un ancho promedio de 4,5m, en algunos tramos puede extenderse o reducirse. Por otro lado, el espaldón que es el espacio que hay entre la calle de lastre y el borde del barranco, no posee el ancho suficiente para poder colocar alguna estructura temporal y en las zonas donde sí hay un ancho adecuado el terreno es muy irregular por lo que no es factible su utilización.
4. Presencia de gran cantidad de tránsito vehicular: como se mencionó, la zona de trabajo se encuentra al lado del puente Virilla en la Radial Santa Ana - San Rafael de Alajuela. Esta es una carretera sumamente transitada y se espera que la obra cause el menor impacto posible en el flujo vehicular, además de esto se debe considerar que se trabajará con piezas pesadas que requiere transporte por lo que la circulación de tránsito pesado será regular.

Tomando en cuenta estos factores y que la calle de lastre no puede quedar obstruida, debido al uso que le da la CNFL, el diseño de sitio debe acoplarse a las necesidades del espacio, por lo que estructuras como los talleres, los vestíbulos, la bodega y la oficina, serán imposibles de colocar en el sitio de trabajo. Sin embargo existen obras temporales necesarias para la ejecución de cualquier trabajo, en este caso es necesario colocar al menos una cabina

sanitaria que cumpla con los requerimientos establecidos. Además es muy importante que en el sitio de trabajo se cuente con un abastecimiento de agua potable, así como una posible zona de primeros auxilios en caso de emergencias.

## **Análisis y diseño de sitio zona de San Rafael de Alajuela**

En este margen las limitaciones son completamente diferentes a las de la zona del margen de Santa Ana, por eso hay que considerarla de forma individual. Dentro de las principales limitaciones que se encontraron en este sector están:

1. Zona de trabajo muy reducida y topografía muy irregular: la zona de trabajo es sumamente reducida e incluso el ingreso de maquinaria es muy complicado. Aunado a esto la topografía del lugar es irregular y aunque se realicen movimientos de tierra, la zona sigue siendo de difícil acceso para la maquinaria. En este caso la utilización de grúas se dificulta y cualquier movimiento con esta es preferible realizarlo desde la superficie de ruedo del puente vehicular.
2. Existencia de construcciones precaristas imposibles de desalojar; en esta margen del cañón se ubican dos construcciones precaristas que no se pueden reubicar ni demoler, lo que reduce el espacio y obliga a tener más cuidado con el manejo de cargas y la ubicación de estructuras temporales. Es importante tener en consideración que se debe dejar libre la zona de acceso a estas casas, por lo que el diseño de sitio de este sector también se verá influenciado por esto.
3. Cercanía con la carretera principal; en este sector el punto de acceso consiste en un pequeño descanso al lado de la carretera principal; el movimiento de materiales o maquinaria en esta zona afectaría directamente la circulación vehicular en la radial.

Debido a los factores mencionados se propone que en este lugar únicamente se ubique una cabina sanitaria con su respectivo lavatorio con agua potable, así como una zona para primeros auxilios. En el caso del colocado de

cerchas, gracias al sistema utilizado para el montaje del puente, este se puede realizar desde el margen de Santa Ana.

En cuanto a los trabajos que se harán en la parte de Santa Ana, el acceso es restringido, ya que la calle es propiedad de la CNFL, por lo que no es necesario cerrar este sector. Caso contrario ocurre en la parte de San Rafael, ya que la entrada da a una calle pública, sin embargo se debe habilitar un acceso para las casas que se ubican en la zona y prever que este no obstruya la posible manipulación de cargas, la maquinaria o una posible emergencia.

En el apéndice 4 se muestran los esquemas de las propuestas de diseño de sitio tanto del sector de Santa Ana como del sector de San Rafael.

# **Aspectos estructurales y de diseño**

## **Análisis arriostre de las torres**

### **Estados límite de falla y fractura**

Debido a que un miembro en tensión puede fallar al alcanzarse en el elemento uno de los dos estados de falla (fractura y fluencia), fue necesario realizar la revisión de la capacidad del mismo. En los planos constructivos se indica que se utilizará un elemento de acero grado 50 W12x35, además, según información del diseñador, la carga última que debe resistir este elemento es de 209 toneladas.

En cuanto al estado límite de Fluencia se obtuvo como resultado una capacidad de la sección de 209,32 toneladas. Este valor se encuentra por encima de la carga última, por lo que la sección W12x35 cumple con los

requerimientos necesarios. Por otro lado, se revisó el estado límite de fractura; se obtuvo un valor de 261,65 toneladas, el cual es mayor que la carga última, lo que indica que el elemento es adecuado.

Este resultado se espera puesto que la teoría indica que un elemento sometido a tensión primero sufrirá la falla debido a la fluencia del mismo, en este caso si el elemento se deforma daría un aviso de falla. Por otro lado una falla por fractura es mucho más grave puesto que el elemento colapsaría totalmente de forma repentina.

## Revisión de la propuesta de transición entre el perfil W y las varillas #8

El objetivo final de esta configuración es lograr la transmisión efectiva de la tensión desde el perfil W a través de las varillas hasta llegar al bloque de anclaje. Se determina que para alcanzar esta condición se debe tener un área de acero de  $61,53\text{cm}^2$ , el área de acero aportado por las 14 varillas es de  $71,4\text{cm}^2$  por tanto la cantidad de varillas es adecuada para lograr una buena transmisión entre ambos elementos.

Sin embargo, también se debe asegurar que la soldadura que une las varillas con el perfil W soporta los esfuerzos a los que será sometida; para esto en planos se especifica una longitud de soldadura de 15 cm con una garganta de 1,2 cm, por lo tanto se cumple satisfactoriamente con los requerimientos establecidos en AISC. Por otro lado, se determina que la parte más débil de la unión radica en el metal base, el cual constituye el componente más importante del perfil W, no obstante la longitud y garganta de la soldadura propuesta cumplen con los requerimientos de la unión.

## Diseño de la unión entre el arriostre y la torre del puente

Para el diseño de esta soldadura se buscaba que el operario no tuviera que cambiar constantemente del electrodo y solamente variar la garganta. En este caso existieron secciones en las que la posible falla se daría en el metal base

mientras que en otras el elemento débil era la soldadura, por esta razón el diseño se realizó considerando este factor.

En el caso de la unión se obtuvo una capacidad total de 329 toneladas, mientras que el requerimiento es de 209 toneladas por lo que la unión cumple adecuadamente. Cabe mencionar que aunque la capacidad de la unión es muy superior al requerimiento, este diseño no se puede mejorar más porque en el análisis se utilizó el tamaño mínimo recomendado en el manual del AISC, por lo que se recomienda no disminuir dichas soldaduras.

## Revisión de la longitud de desarrollo de las varillas del anclaje

Con el fin de evitar que las varillas embebidas en el concreto puedan extraerse es importante verificar la longitud de desarrollo. Se realizó el análisis con dos metodologías diferentes; en primer lugar se utilizó la formulación brindada en el CSCR 2010 y se obtuvo un valor de longitud de desarrollo de 39,85 cm y un terminal de gancho de 30,48 cm.

Por otro lado, se realizó el análisis utilizando la sección 12.5.2 del ACI lo que dio como resultado una longitud de desarrollo de 42 cm, sin embargo, debido al recubrimiento que poseen las varillas a este valor se le aplica un factor de 0,7, según lo indicado en el inciso 12.5.3 del ACI, lo que finalmente da 30 cm.

En planos se indica una longitud de desarrollo de 60 cm y un terminal de gancho de 40 cm, así los resultados obtenidos con el CSCR 2010 y el ACI están por debajo de lo especificado, lo que indica que la longitud es adecuada.

# Transición entre las torres y el cable

## Revisión del elemento utilizado para la conexión entre los cables principales y la torre

### Requerimientos dimensionales

Luego del análisis de los requerimientos establecidos por el AISC para este tipo de elementos se encontró que se incumplía con algunos de ellos. En primer lugar se tiene que  $b_{eff}$  debe ser menor que la distancia medida entre el borde del agujero hasta el borde de la placa ubicado perpendicular a la fuerza, en el caso del elemento presentado en los planos esta distancia corresponde a 5,5 cm mientras que para  $b_{eff}$  se obtiene un valor de 6,68 cm por lo que se debe aumentar esta distancia.

Por otro lado, se tiene que la distancia entre la parte posterior del agujero y el borde de la placa en dirección paralela a la fuerza debe ser mayor que  $1.33b_{eff}$ , sin embargo la pieza diseñada no cumple con este requerimiento, por lo que es necesario redimensionar la sección. Con respecto a los demás requerimientos dimensionales la pieza propuesta sí cumple con los mismos. En el siguiente cuadro se muestra las dimensiones mínimas con las que debe contar el elemento para cumplir con las especificaciones.

### Cuadro 10. Dimensiones propuestas para el dimensionamiento del elemento.

W	t	d	a	c	b
30 cm	2,54 cm	9 cm	9 cm	14,8 cm	7 cm

Fuente: Elaboración propia.

### Cuadro 11. Corrección mínima que se debe aplicar al dimensionamiento de la pieza.

Dimensión	Según plano	Propuesta	Diferencia
W	30 cm	30 cm	0 cm
t	2,54 cm	2,54 cm	0 cm
d	9 cm	9 cm	0 cm
a	7 cm	9 cm	2 cm
c	14,8 cm	14,8 cm	0 cm
b	5,5 cm	7 cm	1,5 cm

Fuente: Elaboración propia.

### Condiciones de falla

Para el elemento estudiado se realizó el análisis de los cuatro posibles modos de falla ya mencionados. Se tenía que la carga última era de 52,5 Ton, según el modelo del diseñador, por tanto la tensión en el área neta efectiva, el cortante en el área efectiva y la tensión en la sección total, debían ser mayores que la carga última, para asegurarse que este elemento no fallara. En los tres casos estudiados se encontró que el elemento cumple con los requerimientos.

En el caso del aplastamiento se calcula con el fin de evitar que el elemento sufra una falla en el agujero provocada por el aplastamiento del perno. Se tenía que el aplastamiento que debe soportar la pieza es de 49,6 Ton, según el modelo del diseñador, luego del análisis se obtiene que el elemento posee una capacidad de 108,5 Toneladas razón por lo que cumple con los requerimientos.



# Aspectos constructivos

## Comparación entre las propuestas de montaje

Se planteó el análisis de cuatro puntos esenciales para realizar una comparación de los métodos de montaje de las cerchas del puente que conforman la estructura de soporte del tubo de agua potable, de esta forma se determinará cuál de los dos métodos se acopla mejor a los requerimientos propios del sitio y por ende será más eficiente.

### Influencia sobre el tránsito vehicular

Uno de los objetivos que se pretende durante la construcción de esta estructura, radica en que los conductores que utilizan la ruta 147 no sean afectados severamente, por lo que se busca un sistema que trate de no cerrar vía por completo ni por mucho tiempo, considerando también que existe una parte burocrática que limita la utilización plena del puente vehicular.

Cabe señalar que tanto el procedimiento método de montaje que utilizan grúas tipo camión, como el método que emplea cables secundarios y “grúa teleférico” pueden llegar a afectar de manera directa el tránsito vehicular, sin embargo, la diferencia está en que el primero requiere el cierre total de la vía durante todo el proceso de montaje, sin que exista la posibilidad de habilitar un carril para hacer paso regulado; mientras que con el segundo sistema los posibles cierres no serían prolongados, pero por seguridad, si se hicieran, se recomienda hacerlo en ambos carriles.

Los cierres momentáneos que se plantean para el segundo sistema se darían principalmente porque en el extremo ubicado en

el lado de San Rafael las condiciones de espacio y topográficas podrían entorpecer el posicionamiento inicial de la cercha, por lo que se haría este movimiento con una grúa tipo camión desde el puente vehicular.

### Movimientos cerca de los cables eléctricos

Como se ya se explicó los cables de alta tensión ubicados sobre la torre del puente del sector de Santa Ana son un tema al que se le debe prestar atención, ya que el voltaje que transportan es muy elevado, esto representa un riesgo para cualquier trabajo. Estos cables se ubican a unos 7 metros por encima de la torre, es inevitable que al realizarse el montaje de los cables principales se trabaje dentro de esta zona de peligro, sin embargo, lo que se busca es trabajar el menor tiempo posible en esta situación de peligro. En el caso del montaje por medio de la grúa tipo camión la colocación de primeras secciones obligaría al operador a trabajar dentro de la zona de peligro y se debe considerar que dicha maniobra tendrá la influencia de factores ambientales y humanos, lo que provoca un aumento del riesgo.

Por otra parte, el sistema de cables secundarios y “grúa teleférico” es manejado de forma remota por diferentes controladores desde una zona relativamente segura, esta condición ayuda a reducir enormemente la posibilidad de un accidente debido a errores humanos, tales como: descuidos del operador de la grúa o mala comunicación durante las maniobras de izaje de cargas. Es importante mencionar que únicamente durante la colocación de los cables secundarios y de las grúas se estará trabajando dentro de la zona de peligro, condición que no se puede revertir debido a que es imposible desconectar las líneas de corriente, por ende se deben tomar las medidas necesarias para evitar accidentes.

### Posicionamiento de las cercha entre los cables principales

Este factor se considera un problema en el método que utiliza grúas tipo camión, ya que el margen de espacio para pasar la cercha en

medio de los cables principales es muy reducido, esto aunado a las condiciones ambientales y a la poca visibilidad que tendrá el operador de la grúa se convierte en el mayor problema en caso de implementar este sistema. En el caso del otro tipo de montaje propuesto, este problema no se presenta puesto que los cables secundarios se colocan de forma tal que no interfirieran con los cables principales, además la colocación se realizaría desde debajo de los cables principales, lo que facilita enormemente la maniobra.

Al igual que en el caso anterior, uno de los factores a considerar radica en que el movimiento que se debe ejecutar requiere precisión y el margen de error es muy pequeño, por lo que el disminuir las variables que posibilitan las fallas es importante. El método de los cables secundarios y la "grúa teleférico" provee un sistema en donde todas estas variables son más controladas y como consecuencia el error disminuye.

## Procedimiento de montaje de las cerchas

En cuanto al procedimiento de montaje por medio de grúa tipo camión el principal problema radica en la falta de espacio ya que el operador únicamente tendrá el ancho de calle para maniobrar, lo que dificulta el viraje y posicionamiento de la maquinaria. Además, se debe considerar que el izaje de las secciones de cercha realiza un movimiento riesgoso tanto para la maquinaria como para los operarios, ya que se debe girar la pieza mientras se suspende y posteriormente se debe alinear para colocarla. Este giro de la pieza trae consigo una serie de riesgos debido al poco espacio para maniobrar y la velocidad del viento en la zona puede provocar movimientos desestabilice la grúa.

En lo que respecta al otro método de montaje, el único factor que podría provocar problemas es la colocación de la cercha en el borde para que la grúa la sujete, esto porque en el sector de San Rafael las condiciones topográficas y de espacio pueden provocar que se tenga que utilizar una segunda grúa para realizar la maniobra, no obstante este factor debe ser revisado con detenimiento en el campo, ya que una posible remoción de material puede crear la superficie necesaria para dicho fin. En

cuanto al movimiento de izaje este beneficia enormemente el flujo de la construcción, ya que mientras la grúa se encarga de izar y poner en posición el elemento, la cuadrilla se encarga de colocar otra sección de cercha para ser transportada, lo que agiliza enormemente el montaje.

# Análisis arriostre de las torres

## Proceso constructivo

Como resultado de la ausencia de un proceso constructivo que ayude a ejecutar la actividad de colocación del arriostre del puente se describirá una propuesta que considere algunos aspectos relevantes para la realización de dicha actividad. Como primer punto es necesario destacar las subactividades correspondientes a la colocación de dicho arriostre, esto con el fin de lograr establecer un orden lógico de las mismas. Las subactividades planteadas son:

- Soldadura de las varillas #8 al perfil W.
- Colocación de la armadura de los bloques de anclaje.
- Posicionamiento del perfil W.
- Soldadura del perfil W a la torre.
- Formateo de los bloques de anclaje.
- Colado de los bloques de anclaje.

Ahora bien, en el caso de la preparación del perfil W es recomendable que las soldaduras de las varillas se realicen en el taller de Fernández Vaglio, ubicado en el plantel de Pozos de Santa Ana; esto debido a que en el sitio no se cuenta con el espacio suficiente para la construcción temporal de un taller para este tipo de actividades. De igual manera, la armadura de los bloques de anclaje se debe hacer, en su mayoría, en el plantel para posteriormente transportarse al sitio de trabajo.

Luego de transportar los materiales al sitio se procederá con la colocación de la armadura de los bloques de anclaje. Cabe mencionar que los elementos previamente

armados en el taller deberán ser ajustados con el fin de colocarse en el sitio. Ya con la armadura colocada será conveniente la construcción de una estructura temporal o la ayuda de una grúa para colocar provisionalmente el perfil W, esto con la finalidad de hacer los ajustes necesarios previos al colado del bloque y soldadura del elemento en especial el corte que se debe elaborar en el perfil W para hacerlo encajar con en el tubo de la parte superior de la torre. Luego de los ajustes mencionados se colocará en posición el arriostre, mediante una grúa o una estructura provisional, y se procederá a soldar la parte superior, no sin antes verificar que todos los elementos se encuentren en posición.

Luego de soldar la parte superior del arriostre se procederá a colocar la formaleta de los bloques de anclaje, después de esto es importante que los inspectores e ingenieros verifiquen todo lo que se hizo. Por último se realizará el colado de los elementos de anclaje, este se hará por medio de un camión mezclador que pondrá el concreto en un recipiente, el cual posteriormente será colocado por una cuadrilla de trabajo, ya que debido a la distancia en que se encuentran los cables de alta tensión es riesgoso utilizar bomba telescópica.

## Transición entre las torres y el cable

### Proceso constructivo

Como ya se dijo, dentro del documento donde se explica el proceso constructivo del puente, no existe un apartado que detalle cómo se procederá con los trabajos a realizar, aunque en reuniones sí se indica el procedimiento. Es fundamental que dentro del plan de construcción se especifiquen los lineamientos para la ejecución de esta actividad, dentro de los cuales se debe mencionar en qué lámina del juego de planos se encuentra el detalle del elemento, así como los aspectos a los que se les debe poner mayor atención.

Es importante que se indique cómo se realizará el proceso de corte de los elementos en sitio, ya que es necesario que esto se haga de manera adecuada para evitar reparaciones en el elemento que puedan provocar fallas. Además se debe especificar qué sistemas se emplearán para el montaje de los mismos, ya que esto deberá realizarse a una altura aproximada de 9m por lo que se debe planificar cuántos operarios serán necesarios y cómo se procederá para lograr que la unión quede según los lineamientos especificados por el diseñador.

Uno de los principales factores que provoca errores durante la construcción radica en la falta de detalles del plano constructivo que a veces el diseñador da por hecho y los operarios improvisan de acuerdo a su experiencia, sin embargo, este método deja mucho al azar y no posee un análisis que respalde dicha decisión. En este caso los planos constructivos brindan el detalle de la unión, pero dejan de lado el detalle de la soldadura que unirá la pieza luego de colocarla en la torre. Este detalle es importante pues este elemento debe soportar al menos 52,5 toneladas lo que lo convierte en un detalle de suma importancia para asegurarse que las condiciones para las que fue diseñado se mantengan luego de que se construye y se ponga en funcionamiento.

Por último, se debe mencionar que una de los principales desventajas de esta metodología constructiva radica en la dificultad de colocar los seis elementos completamente alineados y en un ángulo específico, ya que se debe recordar que el sitio donde se debe soldar se encuentra a una altura aproximada de nueve metros y además, la soldadura se debe realizar en diferentes lugares que pueden resultar incómodos para el operario. La importancia del alineamiento y posición de estos elementos radica principalmente en que cualquier variación entre ellos se ve reflejada directamente en la flecha del puente y es importante que los seis cables posean una geometría idéntica con el fin de asegurar que la repartición de cargas sea equitativa para todos.

# Análisis de flechas durante el montaje

Debido a las características del puente estudiado es necesario definir las flechas que presentará el cable durante su construcción, ya que en un puente colgante tradicional este factor se controla por medio del ajuste del cable ubicado en sus anclajes. No obstante, en esta obra el cable no posee continuidad hasta los anclajes y colocar un sistema de ajuste no es viable debido a que estos provocan una pérdida considerable en la capacidad del puente.

Se analizó el comportamiento del cable para que mediante un seguimiento topográfico se asegure que el mismo quede en la posición deseada y que en caso de ajuste, este se realice en las péndolas diseñadas para este fin. Esencialmente lo que se busca es cerciorarse de que la flecha no quede por debajo de la parte inferior de la cercha, donde sería imposible que las péndolas alcancen el cable debido a la colocación de los soportes en la cercha.

Inicialmente se posee una flecha establecida por el diseñador y cuya única carga es el peso propio del cable (condición 1), al momento de colocar la cercha esta se incrementará en 1,2 metros (condición 2) y consecuentemente la longitud aumentará en 46 cm. Posterior a esto se colocará el tubo de 900 mm de diámetro y causará un aumento en la flecha de 0,4 metros (condición 3) con respecto a la anteriormente, en este caso la longitud del cable varía en 15 cm. Finalmente, al poner en funcionamiento la tubería, la carga producida por el peso del agua provocará que la flecha tenga un cambio de 0,9 metros (condición 4) y la longitud del cable se modificará en 41 cm.

Desde su condición inicial hasta su estado final, la flecha tendrá un desplazamiento total de 2,5 metros y la longitud del cable variará en 1,02 metros. Según los planos, la cercha se colocará a 12,21 metros (medido a la parte inferior de la misma) por debajo de la línea horizontal imaginaria que se forma entre la parte superior de ambas torres del puente en construcción. Como se observó en los resultados mostrados anteriormente, la flecha máxima será de 12,2 metros, por lo que esta quedará

prácticamente en línea con la parte inferior de la cercha.

Debido a la imposibilidad de realizar ajustes en el cable principal una vez que este esté colocado, será necesario tomar ciertas medidas para que el cable no sobrepase la parte inferior de la cercha. Es importante recordar que debe existir un margen de seguridad, puesto que los trabajos en obra podrían presentar errores y aunque siempre se trata de contemplar todos los factores, cabe la posibilidad de que exista algún grado de desacierto en los cálculos.

**Cuadro 12. Cambio de flecha en las diferentes condiciones de carga**

Condición	Flecha medida desde soporte de los cables	Aumento de flecha de acuerdo al estado anterior
1	9,7 m	-----
2	10,9 m	1,2 m
3	11,3 m	0,4 m
4	12,2 m	0,9 m

Fuente: Elaboración propia.

## Propuesta de montaje del puente

### Montaje de la cercha de extremo a extremo

#### Tensión en el cable

Luego de realizar el modelo del cable en el programa SAP 2000 se obtuvo que la tensión máxima producida durante el proceso de montaje es de 49,05 toneladas. Esta tensión es generada cuando se coloca el último tramo de cercha. Este es el dato más importante puesto que las tensiones generadas antes de esta son menores y por ende el cable no fallaría ante dichas cargas. Para esta obra los cables utilizados son de acero, tipo Angula 6x36 ws AA de 38mm, cuyo proveedor es Prodinsa. Según las tablas de

capacidad para este cable (ver anexo 5) se tiene que la carga de rotura mínima garantizada corresponde a 106,9 Ton.

Como se mencionó, la tensión máxima obtenida del modelo es de 49,05 Ton y aplicando un factor de seguridad de 3, el cual es recomendado para este tipo de elementos, se obtiene una tensión máxima de 147,15 toneladas. Este valor sobrepasa por aproximadamente 40 Ton la capacidad del cable especificada por el proveedor. En el caso del montaje se estaría trabajando con un factor de seguridad de 2,18, el cual es inferior al valor recomendado.

Cabe mencionar que el valor brindado por el fabricante corresponde al mínimo, por lo que la capacidad máxima del cable es mayor a la indicada, además el factor de seguridad aplicado se utilizó de acuerdo con lo indicado en la teoría donde además se menciona que dicho valor depende de algunas variables que debe considerar el ingeniero responsable. Debido a la necesidad del montaje no existe la posibilidad de utilizar más cables durante el mismo ni tampoco se pueden emplear cables de mayor capacidad, por ello durante el montaje, los ingenieros encargados deben estar pendientes de cualquier cambio o deformación en los cables, con el fin de resguardar la seguridad de la obra.

## Deformada del cable y comportamiento de la cercha

La deformada del cable, producto del procedimiento del montaje gradual de cargas, se da en función de la sección que se vaya colocando. En el momento de poner la primera cercha la sección donde se ubica tendrá una forma parabólica, pero la otra parte del cable tenderá a tomar una forma recta, debido a la distribución asimétrica de la carga, como se aprecia en la figura 42 de la sección de resultados. Este comportamiento se mantiene hasta que se coloca la octava sección de la cercha, en este momento el cable adquiere la forma parabólica típica en este tipo de estructuras.

La deformación propia del cable provoca un efecto en la posición de la cercha durante el montaje y debido a que las péndolas se construirán con una longitud definida para cada sección, solamente se podrán realizar ajustes

pequeños. Como se puede observar en la figura 43 en la sección de resultados, conforme se colocan las primeras secciones de cercha, la misma tenderá a inclinarse hacia arriba en sentido de avance, conforme transcurre el montaje. Este comportamiento tiene una implicación negativa para la metodología constructiva ya que se pretende realizar la unión de las secciones por medio de soldadura en sitio y al inclinarse de esta manera, la ejecución de una soldadura será difícil de hacer. Además, si se realizará la soldadura esta quedaría sometida a esfuerzos provocados por la posición, que pueden causar el debilitamiento de la misma.

En un proyecto anterior del AyA en la zona de río La Estrella, en Limón, se implementó este procedimiento para el montaje de un puente colgante y se evidenciaron los problemas descritos anteriormente (ver fotos de este montaje en anexo 6), la única diferencia entre ambos proyectos era el diámetro de la tubería y la luz del puente, ya que en el proyecto del Virilla son mucho mayores, por lo que estos problemas podrían magnificarse debido a la proporción.

## Montaje desde el centro hacia los extremos

### Tensión en el cable

Como ya se indicó, en los resultados se obtuvo una tensión máxima de 49,03 toneladas, este valor es prácticamente igual al del análisis realizado con el proceso de montaje anterior, lo que ayuda a comprobar la validez del modelo, puesto que ambos resultados, en teoría, deberían ser iguales y en este caso se cumple dicha suposición. Debido a que la tensión máxima es la misma, sería innecesario analizar este resultado puesto que en la parte anterior ya se hizo.

### Deformada del cable y comportamiento de la cercha

Este tipo de montaje requiere que las secciones de cercha se empiecen a colocar desde el centro hacia los bordes. Se realizará alternando el lado de colocación, esto con el fin de compensar la

deformación provocada en el cable. Como se puede observar en la figura 45 de la sección de resultados, durante la colocación de las cerchas el cable mantiene una forma parabólica, lo que favorece en gran medida el montaje, puesto que es más sencillo controlar la modificación de la flecha conforme se van colocando las secciones, esto porque el desplazamiento del cable únicamente será en sentido vertical, a diferencia del montaje anterior en donde el desplazamiento del cable se producía en forma vertical y horizontal.

Por otra parte, cuando vemos la figura 46 de la sección de resultados, se puede observar el comportamiento de la cercha durante el montaje, en este caso las secciones mantienen la horizontalidad, lo que beneficia la unión de las cerchas por medio de la soldadura. Además, la misma no sufrirá de los esfuerzos provocados por el efecto que se mencionó en el otro procedimiento. Este tipo de montaje es común en puentes colgantes con grandes luces, por lo que su eficacia es respaldada con la experiencia de varios proyectos alrededor del mundo.

Finalmente, en la figura 43 como la 46, de la sección de resultados, se puede observar que luego de realizar el cierre en los bordes de cañón se produce un efecto de curvado hacia arriba de la cercha; este efecto es el que se conoce como contraflecha y se produce por el empuje hacia arriba que provoca el cable principal sobre la cercha, el cual es mitigado al momento de colocar el tubo dentro de la estructura y posteriormente al pasar el agua a través del mismo.

## Evaluación del plan de seguridad

En el caso de la identificación de riesgos se deberá establecer una lista de actividades y recursos con el fin de tener un panorama más claro de las actividades a realizar. Esta primera etapa es muy importante, ya que da paso a la elaboración de una matriz de riesgos adecuada para la obra y finalmente la propuesta de los diferentes mecanismos de protección que ayuden a reducir la posibilidad de accidentes durante la obra.

## Mejoras propuestas al plan de seguridad brindado por la empresa

Con el fin de ayudar a mejorar los resultados presentados por la empresa constructora, se analizan algunos puntos para incluir ciertos aspectos que no fueron considerados en la propuesta existente. Como primer paso se elaborará un listado de actividades y recursos que permita tener un panorama de las actividades a realizar y así poder identificar los riesgos propios de cada una, para posteriormente evaluar el riesgo presente y determinar algunas medidas necesarias para mitigar las fuente de peligro.

### Lista de actividades y recursos

El proyecto del montaje del puente para agua potable sobre el río Virilla consta esencialmente de seis actividades principales, que se subdividen en actividades secundarias, las cuales cuentan con un determinado número de recursos, esenciales para su ejecución satisfactoria. Las principales actividades de este proyecto son:

- Reforzamiento de las fundaciones.
- Reforzamiento del sistema de arriostamiento entre la torre y el anclaje.
- Reforzamiento de la torre y montaje de los elementos donde se sujetarán los cables principales.
- Montaje de los cables principales y péndolas.
- Montaje de la estructura tipo cercha que llevará el tubo que transportará el agua potable.
- Colocación del tubo en la cercha.

Luego de identificar las actividades principales que componen esta obra es necesario desglosarlas, con el fin de obtener otras más específicas que a su vez nos ayuden a conocer los recursos utilizados en cada una de ellas. Seguidamente se muestran las tablas con los resultados del planteamiento realizado.

## 1. Reforzamiento de las fundaciones

Actualmente se encuentran construidos cuatro pedestales, cada uno posee tres anclajes postensados. La actividad consiste en la construcción de dos anclajes más por cada pedestal para un total de cuatro anclajes. Dentro de esta actividad se detallan los siguientes procedimientos y recursos:

### Cuadro 13. Actividades y recursos para el reforzamiento de fundaciones.

Actividad a realizar	Recursos
Limpieza de la zona de trabajo. Esto debido a que el proyecto estuvo detenido por un tiempo y la zona de trabajo tiene vegetación a su alrededor. Además es necesario remover un área rocosa, con el fin de colocar los nuevos anclajes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de limpieza.</li> <li>• Backhoe.</li> <li>• Martillo hidráulico.</li> </ul>
Perforaciones de la zona donde se realizarán los anclajes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Máquina perforadora.</li> </ul>
Colocación de la estructura que compone los anclajes activos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> </ul>
Colado de los anclajes activos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Mezcladora (Chompipa).</li> </ul>
Tensados de los anclajes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> </ul>

Luego de finalizar los anclajes activos es necesario hacer los bloques de concreto que se encuentran ubicados sobre dichos anclajes previamente construidos. Esta actividad consta de las siguientes subactividades y recursos:

### Cuadro 14. Actividades y recursos elaboración bloques de anclaje.

Actividades a realizar	Recursos
Colocación del acero de refuerzo. En esta actividad también se colocará el perfil W, utilizado como arriostre de las torres, en su posición final.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Taller de armadura.</li> <li>• Sistema de posicionamiento provisional del arriostre.</li> </ul>
Formaleteo de los bloques a colar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Taller para elaborar formaleta.</li> </ul>
Colado de los bloques de concreto ubicados sobre los anclajes activos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Mezcladora.</li> <li>• Vibrador</li> </ul>

## 2. Refuerzo de la cercha metálica

Con el rediseño elaborado es necesario hacer ciertas modificaciones a las cerchas existentes, estas se encuentran en las bodegas de la empresa Fernández Vaglio ubicadas en Pozos de Santa Ana, por lo que los trabajos se llevaran a cabo en dichas instalaciones y posteriormente se transportarán al sitio.

### Cuadro 15. Actividades y recursos del refuerzo de la cercha.

Actividades a realizar	Recursos
Medición y corte de las piezas utilizadas para realizar el añadido a las cerchas existentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo</li> <li>• Equipo para el corte de perfiles de acero.</li> </ul>
Soldado de las nuevas secciones a la cercha existente. Todo esto de acuerdo a los planos constructivos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personal calificado en soldadura.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> <li>• Herramientas necesarias para</li> </ul>

	soldadura.
Chequeo de la soldadura realizada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspector encargado y calificado para la revisión.</li> </ul>
Soldado de los atezadores en las secciones de la cercha, indicadas en los planos constructivos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personal calificado en soldadura.</li> <li>Máquina de soldar.</li> <li>Herramientas necesarias para soldadura.</li> </ul>
Soldado de los soportes diseñados para la colocación del tubo dentro de la cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personal calificado en soldadura.</li> <li>Máquina de soldar.</li> <li>Herramientas necesarias para soldadura.</li> </ul>
Colocación y soldado de los elementos encargados de unir las péndolas con la cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personal calificado en soldadura.</li> <li>Máquina de soldar.</li> <li>Herramientas necesarias para soldadura.</li> </ul>
Chequeo de la soldadura realizada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspector encargado y calificado para la revisión de soldaduras.</li> </ul>
Colocado de anticorrosivo y acabado de las cerchas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajadores.</li> <li>Maquinaria para la colocación de la pintura.</li> </ul>

### 3. Refuerzo y modificación de las torres

Otra de las estructuras a las cuales hay que realizar reparaciones son las torres, tanto del margen ubicado en la zona de Santa Ana como en el margen de la zona de San Rafael. Dichas torres ya se encuentran construidas en el sitio, por lo que la mayoría de trabajos deberá realizarse en el lugar.

**Cuadro 16. Actividades y recursos del refuerzo de las torres.**

Actividades a realizar	Recursos
Eliminación de las diagonales en la sección superior, así como el tubo ubicado en la parte superior.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajo.</li> <li>Grúa tipo camión.</li> <li>Maquinaria para corte.</li> <li>Plataforma hidráulica o andamio.</li> </ul>
Corte de los elementos de refuerzo que se colocarán en la torre, tanto los tubos HSS de 30cm de diámetro como los tubos 20x20x0,48cm.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios encargados del corte.</li> <li>Taller para la medición y corte de los elementos mencionados.</li> <li>Maquinaria de corte.</li> </ul>
Colocación y soldado de los Tubos HSS de 30cm de diámetro ubicados en la parte superior de las torres. En este paso se pretende colocar los terminales de los cables principales en los tubos HSS antes de ser soldados a la torre.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios encargados de la soldadura.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>Grúa tipo camión.</li> <li>Máquina de soldar.</li> </ul>
Colocación de perfiles con dimensiones de 20x20x0,48cm. Ubicados en la parte superior de las torres.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios encargados de la soldadura.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>Grúa tipo camión.</li> <li>Máquina de soldar.</li> </ul>
Colocación de las placas de acero, grado 50 t=1.59cm, ubicadas en la parte superior de las torres.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios encargados de la soldadura.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>Grúa tipo camión.</li> <li>Máquina de soldar.</li> </ul>



Soldadura de las diagonales ubicadas en la parte superior de la torre, elementos de 10x10x0,32cm.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios encargados de la soldadura.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>• Grúa tipo camión.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> </ul>
Soldadura del refuerzo en las columnas, el cual consiste en angulares colocados en las cuatro esquinas de la columna.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Maquinaria para corte.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> <li>• Herramientas necesarias para soldadura.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>
Colocación y soldado de las placas de acero (T=0.95cm) ubicadas al pie de las torres entre los pernos existentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Maquinaria para corte.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> <li>• Herramientas necesarias para soldadura.</li> </ul>
Soldadura del refuerzo en las diagonales de la cercha según lo especificado en planos, 2 pletinas de acero grado 50 de 5x0,32cm.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Maquinaria para corte.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> <li>• Herramientas necesarias para soldadura.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>
Soldadura de las placas ubicadas en las uniones entre columnas - arriostres y vigas - arriostres, placas de acero grado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Maquinaria para corte.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> </ul>

50 de 6,4mm.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herramientas necesarias para soldadura.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>
Chequeo de la soldadura y uniones realizadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspector encargado y calificado para la revisión de soldaduras.</li> </ul>
Colocado de anticorrosivo y acabado de las torres.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajadores.</li> <li>• Maquinaria para la colocación de la pintura.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>

4. Colocación del perfil W utilizado para el arriostreamiento de la torre con los bloques de anclaje.

Una vez reforzadas las torres de acuerdo a lo especificado en planos, es necesario fijar el perfil W a la torre. En pasos anteriores este arriostreamiento fue unido en su parte inferior al bloque de concreto de las fundaciones y se dejó con una estructura provisional mientras se realizaba el refuerzo de la torre.

#### Cuadro 17. Actividades y recursos colocación del arriostre

Actividad a realizar	Recursos
Realizar los ajustes necesarios previos a la soldadura del perfil con la torre.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>• Herramientas de corte.</li> </ul>
Soldadura a la tubería	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios de</li> </ul>

de acero ubicada en la parte superior de la torre.	<p>soldadura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>Máquina y herramientas para soldar.</li> </ul>
Chequeo de la soldadura y uniones realizadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspector encargado y calificado para la revisión de soldaduras.</li> </ul>
Colocado de anticorrosivo y acabado de los anclajes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajadores.</li> <li>Implementos para colocación de la pintura.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>

5. Montaje de la estructura tipo cercha que sostiene el tubo.

Esta es quizás la actividad a la cual se le debe poner mayor atención debido a la complejidad del montaje y a las condiciones del sitio. Además, es la actividad que posee la mayor cantidad de subactividades que se deben desarrollar.

### Cuadro 18. Actividades y recursos montaje de estructura tipo cercha.

Actividad a realizar	Recursos
Colocación de la estructura ubicada en la parte superior de la torre cuya función es posicionar los cables secundarios utilizados en el montaje.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajadores.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> <li>Máquina y herramientas para soldar.</li> <li>Grúa tipo camión.</li> </ul>
Lanzado de los cables secundarios utilizados para la colocación del	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajadores.</li> <li>Plataforma</li> </ul>

“carro” que transportará y posicionara las secciones de la cercha.	<p>hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Grúas tipo camión.</li> </ul>
Colocación del “carro” utilizado para transportar las secciones de la cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grúas tipo camión.</li> <li>Plataforma hidráulica u otro sistema para trabajar en altura.</li> </ul>
Pruebas del sistema utilizado para el montaje del puente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personal encargado de la obra.</li> </ul>
Corte, preparación e inspección de los cables principales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios calificados para esta actividad.</li> <li>Herramientas de corte.</li> <li>Personal encargado de la obra.</li> </ul>
Colocación de los terminales mecánicos de cable, tipo casquillo de vaciado crosby.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnicos calificados para realizar este tipo de conexión.</li> <li>Herramientas necesarias para realizar este tipo de conexión.</li> </ul>
Corte y elaboración de las diferentes péndolas que se sujetaran al cable principal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajo.</li> <li>Máquina para elaborar roscas en varillas.</li> <li>Máquinas de corte.</li> </ul>
Distribución y colocación de las péndolas encargadas de sostener las cerchas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuadrilla de trabajo.</li> <li>Herramientas utilizadas para realizar las conexiones.</li> </ul>
Inspección y verificación del posicionamiento de las péndolas y terminales de los cables.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspectores.</li> <li>Consultores de la obra.</li> <li>Contratistas de la obra.</li> </ul>
Lanzado de dos de los	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operarios.</li> </ul>

cables principales. Verificación de la flecha y de la ubicación de las péndolas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grúas tipo camión.</li> <li>• “Carro” de transporte.</li> <li>• Topógrafos.</li> <li>• Inspectores.</li> </ul>
Posicionamiento de la sección de la cercha para el montaje por medio del “carro” transportador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• Grúas tipo camión.</li> </ul>
Montaje de las secciones de la cercha por medio del “carro” transportador y sujetado a las péndolas previamente colocadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• “carro” transportador.</li> <li>• Verificación con topografía.</li> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> </ul>

Unión de las secciones que componen la cercha por medio de pernos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> <li>• Maquinaria de corte.</li> </ul>
Verificación de ajuste de las péndolas y posicionamiento de los elementos utilizados para realizar la unión entre péndolas y cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• Topógrafo.</li> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> </ul>
Lanzado y enhebrado de los cuatro cables principales restantes y posicionamiento de las péndolas restantes en la cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operario.</li> <li>• Maquinaria de corte.</li> <li>• Maquinaria para realizar soldadura.</li> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> </ul>
Ajuste de las péndolas y revisión.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> <li>• Operario.</li> </ul>
Revisión de los cables principales y de la flecha definida como flecha final.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación con topografía.</li> </ul>

6. Colocación del tubo que transportará el agua potable dentro de la cercha.

Ya con toda la estructura del puente colocada, se continúa con la colocación del tubo en la estructura. Esto se hará luego de que se verifique la horizontalidad de la cercha, la flecha del cable, el posicionamiento de las péndolas y las uniones realizadas con soldadura.

### Cuadro 19. Actividades y recursos colocación del tubo de acero.

Actividad a realizar	Recursos
Posicionamiento de la tubería en el extremo de la cercha con el fin de colocarla dentro de la misma.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Grúa tipo camión.</li> </ul>
Colocación de la tubería dentro de la cercha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuadrilla de trabajo.</li> <li>• Teclé o algún otro sistema de empuje del tubo dentro de la cercha.</li> </ul>
Soldadura de la tubería de acero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operario calificado para realizar este tipo de soldaduras.</li> <li>• Máquina de soldar.</li> <li>• Herramientas para realizar la soldadura.</li> </ul>
Verificación de la posición del tubo dentro de la cercha y calidad de las soldaduras.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación topográfica.</li> <li>• Inspección de soldaduras.</li> </ul>
Corte de los elementos colocados para mantener el tubo en posición.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios.</li> <li>• Taller.</li> <li>• Máquina de corte.</li> </ul>
Soldadura de los elementos, tubo cuadrado de 5x5x0,32cm @ 2m, colocados para mantener al tubo en posición.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operario calificado para realizar soldadura.</li> <li>• Andamio aéreo o plataforma para trabajar en altura.</li> <li>• Máquina y herramientas para soldar.</li> </ul>

## Matriz de riesgos

La elaboración de la matriz de riesgos del proyecto (ver apéndice 3), se hace tomando en cuenta la lista de actividades y recursos determinados en la sección anterior. Para la evaluación del riesgo se emplea la metodología que usa la OSHA 18001 y dependiendo de los resultados obtenidos se plantean las posibles medidas preventivas para evitar accidentes.

Luego de la elaboración de la matriz de riesgos se determinaron para prevenir accidentes. Cada una de ellas diferente de acuerdo al tipo de actividad que se estaría realizando. En este caso el documento presentado por la empresa constructora no puntualiza en cada una de las actividades, sino que brinda medidas generales. Señala el uso de sistemas de protección personal, lo cual, según la matriz de riesgo realizada, se convierte prácticamente en una obligación durante todo el proyecto.

Un resultado muy importante arrojado por la matriz de riesgo es la necesidad de realizar un estudio más profundo de los sistemas que se utilizarán para el control de las caídas en altura, pues debido a la zona de trabajo, un accidente de esta naturaleza representa la muerte casi segura del trabajador, por esta razón es fundamental que la empresa constructora replantee los sistemas de seguridad en alturas que se pretenden aplicar.

## Lista de actividades y recursos

En lo que respecta a este tema se determinó que existen seis actividades principales. El montaje de la estructura tipo cercha que se encarga de llevar el tubo de agua potable es la que consume mayor cantidad de tiempo y recursos. Debido a esta condición dicha actividad debe planificarse mejor y es preciso que la empresa constructora brinde un plan detallado de su ejecución, donde se explique textual y gráficamente los procedimientos que se realizarán, así como los recursos necesarios.

Debido a la importancia de apearse a lo establecido en los planos, se consideró necesario que en cada una de las actividades ejecutadas se realice la inspección debida, con el fin de detectar posibles errores para que se puedan corregir lo antes posible. Además, considerando la

importancia de la obra, los ingenieros a cargo deberán mantenerse durante su ejecución el mayor tiempo posible, y cerciorarse de que las estructuras construidas y los procedimientos establecidos se cumplan según lo planeado.

## Caso de la familia que habita debajo del puente

Al tratarse de un caso donde se encuentra en riesgo la vida de personas ajenas a la obra es esencial que se tomen medidas, sin importar el costo de las mismas. Además, el sistema que se desea implementar debe cumplir con los requerimientos de la familia, pero al mismo tiempo, no debe interferir con los trabajos planeados en la zona. Un factor primordial que se debe tener en cuenta es la comunicación con la familia que habita en la zona, ya que es necesario que estas personas comprendan la importancia de la obra y estén dispuestas a implementar acciones que procuren su seguridad.

Debido a la falta de apoyo por parte de otras instituciones gubernamentales encargadas de temas sociales, la empresa constructora debe considerar el desalojo temporal de la familia o que se implemente algún sistema de protección de la estructura que habitan. Procurando siempre que tanto la familia como el plan de construcción no se vean afectadas en gran medida.

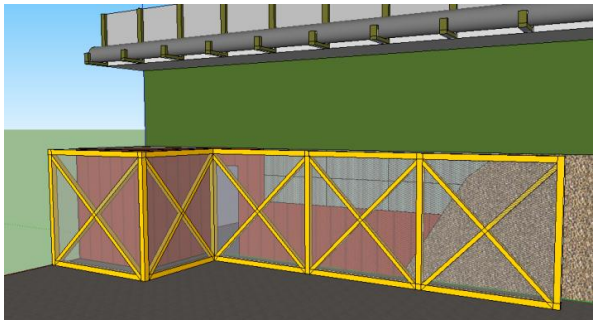
## Estrategias para la protección de la casa de habitación

Luego de hacer un análisis se plantean dos posibles soluciones: la primera consiste en crear una estructura temporal lo suficientemente resistente para que mantenga la integridad de la casa y la seguridad de las personas en caso de que ocurra algún imprevisto. Como segunda opción se plantea desalojar a las personas temporalmente y brindarles un lugar para que se mantengan durante el periodo de los trabajos. Seguidamente se analiza cada una de las propuestas presentadas:

## Estructura temporal de protección

En el caso de la estructural temporal, esta debe ser una pantalla que proteja la vivienda en caso de golpes o cualquier situación que se pueda presentar. Debe poseer una salida para que las personas de la vivienda puedan utilizarla, además no debe ser completamente cerrada para evitar el aumento de la temperatura en la casa, así que lo mejor es que posea algún elemento que permita el paso del aire.

El problema de esta propuesta radica principalmente en el espacio que ocuparía la colocación la estructura, ya que esto reduciría el espacio con que se cuenta para colocar las cerchas que serán izadas. Además se debe tomar en cuenta que implementar una estructural temporal como estas puede provocar un aumento en el costo y en el tiempo de ejecución, por lo que sería necesario que se contemplara en el presupuesto de la obra y en el cronograma de la misma. Seguidamente se muestra un esquema de la propuesta:



**Figura 47.** Esquema de la "pantalla de protección" para la vivienda. (Elaboración propia SketchUp)

Como se puede observar en la figura 47 esta protección únicamente buscará cubrir la zona donde se encuentra la casa, por lo que tendrá una longitud aproximada de 12m y una altura de 2,1m. La pantalla propuesta está constituida por perfiles cuadrados y láminas de metal expandido para cerrar la estructura. Con el fin de que ocupe el menor espacio posible se plantea que los perfiles verticales sean empotrados en el suelo para dar rigidez y así evitar la colocación de arriostres. También con el propósito de usar la menor cantidad de espacio posible se plantea que la pantalla este a 70 cm separado de la pared de la casa, con esta distancia las personas tienen posibilidad de

transitar y la zona de trabajo no se verá muy afectada.

Se realizó un cálculo del mismo y se determinó que sería aproximadamente de \$340250, esto sin tomar en cuenta la mano de obra ni el concreto utilizado para la fijación de los elementos. El desglose de este costo se muestra en el apéndice 5 de este trabajo.

## Desalojo temporal de la casa

Otra alternativa para evitar cualquier inconveniente con la familia que vive en el lugar es negociar una posible salida temporal de la casa de habitación. En este caso la empresa constructora conseguiría un lugar para que la familia se mantenga durante algún tiempo, pues debido a la situación socioeconómica resultaría imposible para ellos incurrir en este gasto.

En caso de buscar una vivienda temporal para esta familia, es importante que la misma se ubique en la zona de Santa Ana o Belén con el fin de que las personas no tengan que trasladarse a un sitio muy lejano. Además, es necesario que la vivienda temporal se encuentre amueblada para que la familia no tenga que invertir dinero ni tiempo en el traslado de bienes.

# Conclusiones

## Respecto al diseño de sitio

- Luego del análisis de los documentos brindados por la empresa encargada de la obra se encuentra que dentro de la planificación previa a la construcción no se consideró la elaboración de un diseño de sitio. Además no se mencionan los principales factores que podrían afectar el flujo de la obra. Tampoco se presenta un levantamiento del sitio donde se muestren las dimensiones de elementos fundamentales, para verificar el posible paso de maquinaria y la factibilidad de realizar las maniobras propias del montaje de la estructura.
- Después de realizar diversas mediciones en el sitio se determinó que existen limitaciones geográficas, por ello, algunas obras temporales como talleres, oficinas, vestidores, etc. Se deben ubicar en un lugar externo a la obra, en este caso en el plantel de la empresa constructora ubicada en Pozos de Santa Ana, esto con el fin de que exista un flujo adecuado de la maquinaria y trabajadores. De esta forma en el lugar se dejaría únicamente las cabinas sanitarias suficientes para la cantidad de trabajadores.

## Respecto a la parte constructiva

### Métodos de montaje

- Con respecto a la afectación en el tránsito vehicular, se determina que el método de

utilizar grúas tipo camión colocadas en la superficie de ruedo del puente vehicular afectaría en gran medida el flujo de automotores, incluso con cierres totales de la vía. Por otra parte, el utilizar el sistema de cables secundarios y grúa tipo teleférico provocaría una afectación moderada en el tránsito vehicular, pues se tendrían que realizar cierres únicamente cuando se posicionen las secciones de cercha en el lado de San Rafael de Alajuela.

Como siguiente punto, el riesgo de electrocución, producto del contacto con los cables de alta tensión que pasan sobre la torre ubicada en el lado de Santa Ana, es mayor para la metodología de montaje por medio de grúas tipo camión y aunque este riesgo es latente en ambas propuestas, se considera que para el método de cables secundarios existe una reducción del mismo.

Por último, en lo que respecta al posicionamiento de las cerchas y el procedimiento de montaje de las mismas, se determinó que debido al espacio disponible para dichas maniobras la utilización del sistema de "grúa tipo teleférico" se acopla mejor a las necesidades geométricas del sitio.

## Procedimiento de montaje

- Comenzar el montaje de la estructura tipo cercha desde el centro hacia los extremos evita que el adquiera una deformación que genere problemas durante el montaje. Mientras que al utilizar un montaje comenzando desde los bordes hacia el centro causará que la deformada que adquiere el cable genere un efecto negativo para la colocación de la cercha.

## Reforzamiento de las torres del puente

- En el documento “Proceso constructivo y montaje de Puente sobre río Virilla” brindado por la empresa constructora, no se menciona el procedimiento utilizado para la actividad de colocación y fijación del arriostre.

En la metodología constructiva propuesta en el documento mencionado, no se muestra el desglose de trabajo que se debe realizar ni las especificaciones técnicas del mismo, así como los detalles en los que se debe de poner mayor cuidado para la colocación del elemento.

- Los elementos utilizados para realizar la transición entre las torres y los cables serán miembros conectados por pasadores y los cables se sujetarán a estos por medio de terminales de vaciado abiertas. El proceso de montaje de dichos elementos no se encuentra especificado en la metodología constructiva brindada por la empresa, por ende no se presentan las consideraciones constructivas respectivas ni se especifican los recursos ni materiales necesarios para esta actividad.

## Comportamiento del cable durante la construcción

- La flecha inicial supuesta para el montaje de las secciones de cercha del puente cumple con los requerimientos constructivos, ya que luego del análisis se determinó que la misma no sobrepasará la parte inferior de la cercha, condición que se busca evitar. Desde su posición inicial a 9,7 m (medido desde la línea imaginaria trazada entre la parte superior de las torres y el vértice de la parábola del cable) sufrirá un desplazamiento vertical total aproximado de 2,5 m, cuya posición final será de 12,2 m. Debido a este cambio de flecha, el cable sufrirá una elongación, inicialmente teniendo una longitud 139,5 m y por efecto del cambio de flecha esta sufrirá un aumento de aproximadamente 1,00 m y quedará en 140,5 m.

- Para el caso del montaje de las cerchas que se encargan de llevar el tubo que transportará el agua potable, la empresa constructora propone realizar el montaje utilizando únicamente dos de los seis cables principales, debido a razones constructivas. Este procedimiento propuesto conlleva a que los cables trabajen con un factor de seguridad de 2,18, el cual se encuentra por debajo del valor recomendado en la teoría, el cual es 3.

## Respecto a la capacidad de los elementos

- Se determinó, según la sección D.5.2 del AISC, que el elemento diseñado para realizar la transición entre cables y torre (miembro conectado por pasador) no cumple con los requerimientos dimensionales mínimos establecidos en dicha sección del AISC. En lo que respecta a los diferentes modos de falla de este mismo elemento se corroboró con las ecuaciones del AISC que sí cumplen con lo recomendado.
- El elemento seleccionado para el arriostre de las torres del puente cumple con el estado límite de falla y fractura, además, la propuesta de utilizar 14 varillas #8 para realizar la transición entre el perfil W y el bloque de anclaje se considera adecuada, así como las longitudes de desarrollo propuestas para el anclaje de dichas varillas.
- Dentro de los planos constructivos no se muestra el detalle de la soldadura de la unión entre el perfil W y el tubo, ubicado en la parte superior de la torre. Por esta razón se hace el diseño de la misma y se obtiene una resistencia de 329 toneladas, la cual es superior a la capacidad mínima requerida.

## Respecto al plan de seguridad

- El plan de seguridad brindado por la empresa Fernández Vaglio Constructora S.A posee debilidades con respecto a la atención específica de problemas, ya que el mismo aborda el tema de una forma general.

- La matriz de riesgo presentada en el documento “Proceso constructivo y montaje de Puente sobre río Virilla”, no contempla ninguna de las actividades específicas del proyecto.
- Los trabajos en altura representan el mayor factor de peligro durante el montaje de la estructura del puente colgante.
- La utilización de una estructura temporal de protección para la vivienda que está en el sitio de trabajo es un método adecuado para reducir el riesgo de accidentes. Esta crea una barrera visual y reduce un posible impacto a la casa.



# Recomendaciones

## Respecto al diseño de sitio

- Se recomienda que la empresa constructora elabore un diseño de sitio que cumpla con los requerimientos básicos especificados en las diferentes normas. También que sirva para verificar que el proceso constructivo elegido sea factible de realizar debido a las limitaciones de espacio que existen en el sitio, por lo que es fundamental que se realice un levantamiento con las dimensiones de las calles, las entradas y los elementos que provoquen obstrucción y cualquier otro detalle importante. En este documento se presenta la propuesta de un diseño de sitio, pero debido al carácter teórico de este trabajo es necesario que se someta a una revisión por parte de la empresa constructora.

## Respecto a la parte constructiva

### Métodos de montaje

- Se considera que la utilización de cables secundarios y “grúa teleférico” esta metodología más adecuada para realizar la maniobra, debido al espacio disponible y a la posición desde donde se realizará el izaje de las secciones para el montaje, así como la poca afectación en el tránsito vehicular y la disminución en el riesgo de electrocución; además se adapta a las necesidades propias del sitio de trabajo. Sin embargo es importante que la empresa constructora elabore un documento donde explique cada uno de los movimientos que se deben realizar para montar cada una de las secciones, en el mismo se deben presentar diagramas de la colocación y posicionamiento, tanto de la maquinaria como también de las secciones.

- Es importante que aparte del diseño del sistema utilizado para el montaje, se diseñen todos los elementos necesarios para ejecutar la obra, como por ejemplo andamios de trabajo. También se debe de realizar un plan de seguridad ocupacional que se adapte al sistema implementado.

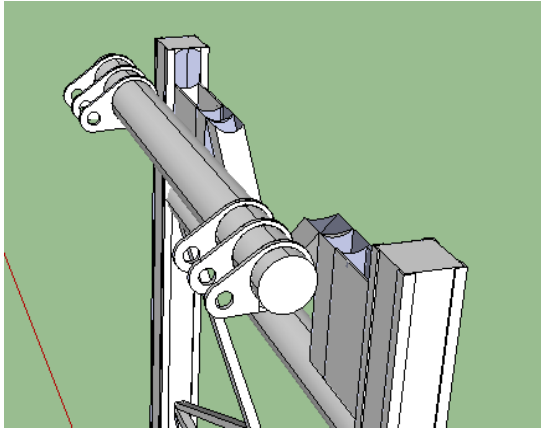
### Procedimiento de montaje

- Luego de analizar las dos propuestas antes mencionadas, se recomienda que el montaje se realice comenzando desde el centro del cañón y se avance hacia los lados, ya que este método produce una deformación menor en el cable, por ende, al colocar las cerchas no se verá afectado el posicionamiento de las mismas y al realizar las uniones entre secciones no se presentará el problema que causaría el utilizar el otro método estudiado.

### Reforzamiento de las torres del puente

- La empresa constructora debe brindar un documento donde explique con detalle los procesos constructivos a implementar, tanto en el caso de la colocación y fijación del arriostre, como en la posición de los elementos que unen la torre con los cables principales. En el mismo es preferible que se muestren diagramas para que comprendan mejor y los operarios contratados para realizar dichas obras.
- En lo que respecta al montaje de los elementos encargados de realizar la transición entre torre y cables se recomienda que se estudie la opción de hacerlo mediante el corte del tubo de la torre, para posteriormente

colocar los seis elementos en el tubo sin tener que cortarlos. Ya con los elementos colocados se posicionará nuevamente el tubo en la torre, lo que busca que los elementos antes colocados queden a 38° según lo especificado en planos y posteriormente volver a soldar el tubo en su posición. En la imagen presentada a continuación se presenta un esquema de este procedimiento.



**Figura 48.** Propuesta para el montaje de los elementos de transición entre arriostre y cables. (Elaboración propia, SketchUp)

Constructivamente este procedimiento disminuye el posible error al tratar de alinear los elementos, ya que la colocación de los mismos se realizaría en el taller, mientras que con el otro método los elementos se deben de soldar in situ mediante una plataforma a una altura de unos 9m. Además, con esta propuesta se evita el corte y soldadura de los elementos y mantiene las propiedades con que fueron diseñados.

## Comportamiento del cable durante la construcción

- Es recomendable que durante todas las etapas del montaje de la secciones de la estructura, se encuentre un topógrafo en el sitio corroborando el desplazamiento vertical de la flecha. Esto porque aunque los cálculos muestran que esta no sobrepasará el límite determinado, pueden existir factores que no se contemplaron en el análisis que provoque una deformación mayor a la esperada y, por ende, se deban realizar correcciones durante

el montaje. Además, con el fin de tener un rango de seguridad se puede proponer una flecha inicial menor a la especificada por el diseñador en cuyo caso no afectará la posición final de la cercha, ya que los ajustes se pueden realizar en las péndolas.

- Debido a aspectos constructivos el montaje de las secciones se debe realizar únicamente con dos cables, esto conlleva a trabajar bajo un factor de seguridad menor al especificado en la teoría. Por esta razón se recomienda que durante el montaje se encuentren en el sitio los ingenieros a cargo para que corroboren los desplazamientos y observen cualquier comportamiento inadecuado del cable que pueda llevar a la falla del mismo.

## Respecto a la capacidad de los elementos

- Es fundamental que el diseñador presente los detalles correspondientes a las soldaduras ubicadas en la unión entre el arriostre y la parte superior de la torre, ya que esta es de suma importancia. Cabe mencionar que en este trabajo se presenta el diseño de dichas soldaduras, sin embargo, por el carácter teórico del mismo, es oportuno que el diseñador someta a revisión cualquier propuesta presentada en este documento.
- Se deben de realizar las respectivas modificaciones en las dimensiones de los elementos utilizados para realizar la conexión entre los cables principales y la torre (miembros conectados por pasador), con el fin de que se cumplan con los requerimientos geométricos de la sección D.5.2 del AISC. De igual manera, en este trabajo se encuentra el análisis respectivo, sin embargo por su carácter teórico debe ser revisado.

## Respecto al plan de seguridad

- Se recomienda que la empresa constructora elabore un nuevo plan de seguridad donde aborde aquellos temas en los que se encontraron algunas debilidades. Además es preciso que se elabore una nueva matriz de

riesgos con las actividades propias de la obra, con el fin de tener un sistema de identificación y evaluación más realista.

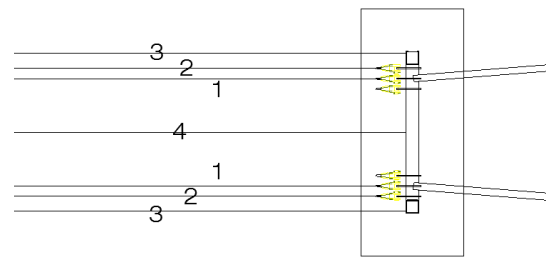
- Es indispensable que todos los sistemas de protección personal y protección contra caídas que fueron mencionados, sean obligatoriamente homologados y certificados con el fin de asegurarse que cumplen con los estándares de calidad establecidos, tanto nacional como internacionalmente. Además, se aconseja revisar minuciosamente todos los sistemas que fueron utilizados y que se pretenden utilizar en este proyecto, ya que existe la posibilidad de que presenten desgaste debido al uso, y esto provoque un mal funcionamiento.
- Se recomienda que antes de comenzar la obra se realice una inducción con los operarios, esto con el fin de explicarles la peligrosidad de los trabajos que se van a realizar. De igual manera, mostrarles los sistemas de seguridad que se emplearán e indicarles la importancia de que los utilicen de acuerdo a las especificaciones, con el fin de evitar accidentes. Además, es importante que los trabajadores conozcan de antemano qué actividades se realizarán en las diferentes etapas, para que se mantengan informados de los riesgos potenciales en cada jornada.

## Recomendaciones sobre los trabajos en altura

Los trabajos en altura podrían ser una de las principales causas de accidentes durante la obra, por ello se presentará una serie de recomendaciones que buscan acoplarse al sistema constructivo elegido y a la zona de trabajo, pero teniendo como prioridad el resguardo de la integridad física de los trabajadores.

El montaje de la estructura se realizará mediante cables secundarios y “grúa teleférico”, por ello se sugiere la utilización de tres cables más aparte de los cables principales y los cables secundarios utilizados para el montaje. Esta configuración de cables brinda una mayor seguridad ya que el sistema de elevación y transporte, como los andamios colgantes y la

línea de vida trabajan de forma independiente. Esta propuesta se detalla a continuación:

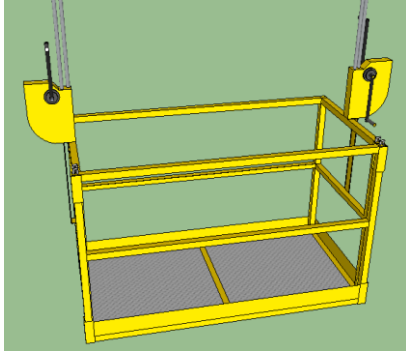


**Figura 49.** Distribución de cables propuesto para los trabajos en altura. (Elaboración propia, Autocad)

El cable 1 corresponde al cable secundario utilizado para el montaje de la “grúa teleférico” el mismo será retirado posterior al montaje. El cable 2 representa al cable principal que se colocará para efectuar el montaje de la estructura posteriormente se pondrán los otros cuatro principales luego del montaje de la estructura. El cable 3 corresponde a la propuesta de utilizar un sistema de cables para la colocación de un andamio colgante que mediante un sistema de poleas tendrá la capacidad de transportarse a lo largo de la luz del puente. Por último se tiene el cable 4, el cual corresponde a una línea de vida que estará fijada firmemente a las torres, pero se posicionará completamente separada de la estructura que se estará colgando, ya que si sucede alguna falla esta debe mantenerse en su posición.

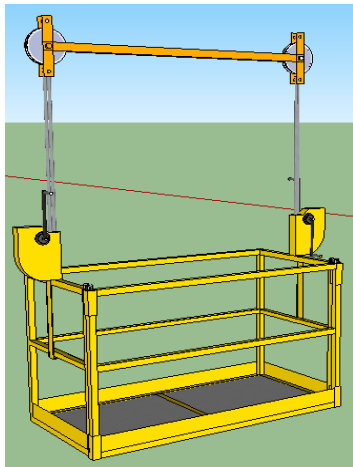
Para el traslado de los trabajadores a lo largo del puente se propone la utilización de un andamio colgante, ya que este tipo de sistema ha sido empleado en proyectos a grandes alturas alrededor del mundo y ha demostrado ser un sistema confiable para los fines deseados. A continuación se presenta un esquema del sistema mencionado.

En la figura 50 se muestra el andamio que se utilizará para el transporte de los trabajadores, el mismo cuenta con dos cabrestantes manuales con el fin de poder subir y bajar según sea la necesidad del trabajo.



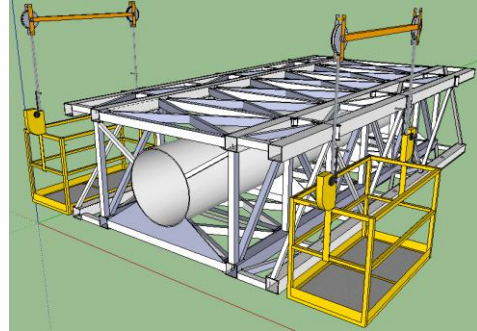
**Figura 50.** Propuesta para el andamio colgante. (Elaboración propia, SketchUp)

Con el fin de lograr el desplazamiento a lo largo de la estructura, se recomienda el uso de un sistema de poleas, el cual será apoyado en los cables mencionados. Para lograr el traslado hacia delante y hacia atrás se deberá implementar la utilización de teclas o winches ubicados en las torres, el cable del tecla será fijado a la estructura de la polea con el fin de jalar el andamio, por este motivo se debe colocar dos; uno en cada torre.



**Figura 51.** Sistema de polea propuesto para el desplazamiento del andamio. (Elaboración propia, SketchUp)

En la figura 52 se muestra la posición que tendrán los andamios en la estructura, este tipo de sistema es fundamental, ya que se necesita una superficie adecuada para poder trabajar en las uniones de cercha que se realizarán cuando se coloque la estructura y durante la soldadura del tubo y de algunos elementos internos de la cercha.



**Figura 52.** Colocación de los andamios durante el montaje. (Elaboración propia, SketchUp)

Además de los andamios será fundamental el empleo de arneses de seguridad, ya que se busca redundancia en los sistemas de protección contra caídas, el mismo debe cumplir con los requerimientos exigidos para este tipo de elementos. Se recomienda también que se coloquen amortiguadores de caída, con el fin de disminuir el desplazamiento que realizaría la persona en caso de un accidente, de esta manera se evitaría el posible efecto péndulo que se produce en una caída.



**Figura 53.** Sistema combinado entre andamio colgante y línea de vida. (Fuente: laclave.com)

El modelo del andamio fue tomado del catalogo de plataformas suspendidas de la empresa ACESSUS (ver anexo 7) y se propone que estos se sujeten de un sistema de poleas para que el mismo se pueda desplazar a lo largo del cable. Es importante mencionar que los esquemas mostrados son únicamente sugerencias que pueden servir para resolver los problemas evidenciados en el plan de seguridad, sin embargo en caso de una posible aplicación es indispensable que los elementos presentados se diseñen con las especificaciones correspondientes.

# Apéndices

## Índice

1. Resultados del SAP 2000 con respecto al análisis de la flecha en las diferentes etapas constructivas.
2. Diagrama de variación de la flecha antes, durante y después del montaje.
3. La matriz de riesgos para el proyecto del puente para tubería de agua potable de Acueductos y Alcantarillados.
4. Diseño de sitio tanto de la zona de Santa Ana como de la zona de San Rafael.
5. Presupuesto respectivo a la obra llamada: "pantalla de protección".

# Anexos

## Índice

1. Documento entregado por parte de Acueductos y Alcantarillados para realizar el análisis presentado en este trabajo.
2. Distancias mínimas que se deben considerar a la hora de realizar trabajos con grúa cerca de cables de alta tensión.
3. Tabla del proveedor de los elementos llamados “terminales de vaciado abiertas”.
4. Imágenes del sitio donde se ubican las construcciones precaristas en la zona de trabajo.
5. Tabla con especificaciones del cable principal utilizado para el puente colgante.
6. Imágenes del proyecto en el río la estrella de Limón.
7. Fichas técnicas del modelo utilizado para realizar la propuesta del andamio colgante.

# Referencias

- Accesus. c2013. **FICHA TÉCNICA, APAREJO ELEVADOR: ELEVADOR MANUAL M.LIFT 400.** España: publicado por la empresa Accesus.
- Accesus. c2013. **FICHA TÉCNICA, ANDAMIO COLGANTE: ACCESUS BASIC.** España: publicado por la empresa Accesus.
- American Institute of Steel Construction. 2005. **ESPECIFICACIONES Y COMENTARIOS SOBRE AISC 2005.** Estados Unidos: Editorial del AISC.
- Ampuero, J. 2010. *Aspectos estructurales en el montaje de puentes colgantes.* MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIÓN. Peru.III Seminario de gestión y Normatividad Vial.
- CFIA. 2010. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA.** Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 400p.
- Comité 318. 2005. **REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL Y COMENTARIO.** Costa Rica: Editorial del American Concrete Institute capítulo Costa Rica.
- Crosby Group. 2011. **TERMINALES DE VACIADO ABIERTAS.** USA: publicado por The crosby group LLC.
- Fernández Vaglio Constructora. 2011. **PROCESO CONSTRUCTIVO Y MONTAJE DE PUENTE SOBRE RIO VIRILLA.** Costa Rica: Publicado por Fernández Vaglio Constructora S.A.
- Fundación Laboral de la Construcción Navarra. 2007. **IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS LABORALES, MEDIDAS PREVENTIVAS Y EVALUACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES Y TÚNELES.** España: Edita Gobierno de Navarra, 226p.
- Galabru,P. 2004. **TRATADOS DE PROCEDIMIENTOS GENERALES DE CONSTRUCCIÓN: OBRAS DE FABRICA Y METALICAS.** Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Gobierno de Costa Rica. c2013. *Reglamento de seguridad en construcciones.* **PRESIDENTE DE LA REPUBLICA Y EL MINISTRO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL.** Decreto N° 25235-MTSS. 23p.
- IMCA. 2007. **DIRECTRICES PARA OPERACIONES DE IZAJE.** España: Editorial empresa International Marine Contractors Association, 66p.
- Instituto Técnico de la estructura en acero. 2011. Puentes. **SISTEMAS ESTRUCTURALES.** ITEA. España, volumen (18): 172-188 p.
- INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE ELEMENTOS SUJETOS A TENSIÓN.** (n.d.) consulta del 10 de febrero, 2013, de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/gatica\\_g\\_jc/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gatica_g_jc/capitulo4.pdf).

Mena, J; Madriz, G; Molina, C. 2002. **LOGÍSTICA DEL SITIO DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE PROCESO CONSTRUCTIVO PARA NAVES INDUSTRIALES**. Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 93 p.

Meune, R. c2013. **CABLES DE ACERO PARA DE OBRAS PUBLICAS, CONSTRUCCIÓN Y CANTERAS**. España: Ediciones Urmo S.A.

OR-OSHA. c2013. **PROTECCIÓN CONTRA CAIDAS**. Oregon: Editorial OROSHA, 30p.

Previ-Atep. 2005. **SEÑALIZACIÓN Y DEMARCACIÓN VIAL EN ÁREAS DE TRABAJO**. Comunicación presentada en el Primer Congreso de Salud Ocupacional del sector eléctrico, 11 de Octubre, Bogota.

PRODINSA. 2010. **CARACTERISTICAS DEL CABLE ANGULA AA**. Chile: Publicado por PRODINSA.

PRODINSA. 2012. **GUÍA DEL USUARIO 2012 PARA EL IZAJE, MOVIMIENTO Y TRINCA SEGURA DE CARGA**. Chile: Publicado por PRODINSA.

**PUENTES COLGANTES**. (n.d.) consulta del 7 de febrero, 2013, de <http://puentes.galeon.com/tipos/pontscol gantes.htm>

Quesada, J. c2013. *Seguridad en la construcción de puentes*. **COLEGIO DE INGENIEROS TECNÓLOGOS DE COSTA RICA**. Serie Revista del Colegio federado de Ingenieros y Arquitectos.

Quiroga, J. 1990. **PUENTES COLGANTES. ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS**. Peru. No 1:1p.

Rojas, G. 2006. **SOLDADURAS**. Costa Rica: Editorial Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Romo, J; Corres, H. c2013. **PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE COLGANTE DE ELCHE**. España: Publicado por FHECOR, 14p.

Segui, T. 2005. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON LRFD**. Estados Unidos: Editorial Internacional. Thomson Editores. SA CV

Solidworks. 2011. **COMPRESIÓN DEL ANÁLISIS NO LINEAL**. España: Editorial corporativa de Solidworks.



