

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Hugo Navarro Serrano, Ing. Manuel Alán Zúñiga, Ing. Ángel Navarro Mora, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS MOYA
(FIRMA)** Firmado digitalmente
por GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)
Fecha: 2021.12.16
09:35:59 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

**HUGO EDUARDO
NAVARRO
SERRANO
(FIRMA)** Firmado digitalmente por
HUGO EDUARDO
NAVARRO SERRANO
(FIRMA)
Fecha: 2021.12.09
11:04:44 -06'00'

Ing. Hugo Navarro Serrano.
Profesor Guía

**MANUEL
ANTONIO
ALLAN ZUÑIGA
(FIRMA)** Digitally signed by
MANUEL ANTONIO
ALLAN ZUÑIGA
(FIRMA)
Date: 2021.12.09
11:47:21 -06'00'

Ing. Manuel Alán Zúñiga.
Profesor Lector

**ANGEL
HUMBERTO
NAVARRO
MORA (FIRMA)** Firmado digitalmente
por ANGEL HUMBERTO
NAVARRO MORA
(FIRMA)
Fecha: 2021.12.09
11:13:33 -06'00'

Ing. Ángel Navarro Mora.
Profesor Observador

Análisis del plan de construcción y proceso constructivo del puente tipo cercha para paso elevado sobre río Aguacaliente ejecutado por Constructora MECO



Abstract

This document develops the case of analysis of the construction plan and the construction process of a truss bridge in charge of Constructora MECO, said structure supports an existing water pipeline of AyA.

To harmonize the previous design of the bridge with its execution and to achieve the planned structural behaviour of the metallic structure, the processes present in the construction plan and the construction process are studied to verify compliance with standards and construction plans.

Likewise, the behavior of the truss structure is analyzed, responding to the company's requirement to quantify the reduction of the back arrow once the bridge is loaded with the pipe.

By these means, the target value of 10,6 cm of theoretical deflection was established, and when comparing this value with that obtained in the field, it was determined that the construction process was adequate for the metallic structure to behave as expected.

The foregoing is supported by the construction feasibility study and the compliance with the construction plan and construction process standards, as well as the inspection of piles and bastions.

Keywords: bridge, truss, pile, abutment, inspection, structural analysis,

Resumen

El presente documento trata el análisis del plan de construcción y del proceso constructivo de un puente de cercha a cargo de Constructora MECO, dicha estructura sirve de apoyo a una tubería de agua existente del AyA.

Con el fin de armonizar el diseño previo del puente con su ejecución y de lograr el funcionamiento planeado de la estructura metálica, se estudian los procesos presentes en el plan de construcción y el proceso constructivo para verificar el cumplimiento de normas y planos.

Asimismo, se analiza el comportamiento de la estructura de cercha respondiendo al requerimiento de la empresa de cuantificar la reducción de la contra flecha una vez que el puente fuese cargado con la tubería.

De esta manera se estableció el valor meta de 10,6 cm de deflexión teórico, al comparar este valor con el obtenido en campo se determinó que el proceso constructivo fue el adecuado para que la estructura metálica se comportara según lo previsto.

Lo anterior es respaldado por el estudio de factibilidad constructiva y cumplimiento de normas del plan de construcción y del proceso constructivo, ratificado por la inspección de pilotes y bastiones.

Palabras clave: puente, cercha, pilotes, bastiones, inspección, análisis estructural.

Análisis del plan de construcción y proceso constructivo del puente tipo cercha para paso elevado sobre río Aguacaliente ejecutado por Constructora MECO

OSCAR EDUARDO LIZANO GUTIÉRREZ

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

Noviembre del 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco Teórico	5
Metodología	12
Resultados	16
Análisis de los resultados.....	67
Conclusiones.....	100
Recomendaciones	102
Apéndices	103
Anexos	104
Referencias.....	105

Prefacio

Los puentes son obras de infraestructura que han permitido el desarrollo del país gracias a las facilidades que ofrecen al entrar en su fase de operación, por tal motivo, es necesario brindarles especial atención desde su concepción y construcción para asegurar su integridad estructural.

El análisis de los planes de construcción y de los procesos constructivos contribuyen a asegurar que la estructura se desempeñe, según el diseño, a la hora en que la estructura se encuentre en uso.

Estos análisis se pueden ejecutar desde diversos puntos de vista, uno de los desarrollados en este documento es la factibilidad constructiva y el cumplimiento de normas. Si desde el principio el plan de construcción carece de información de cómo se deberá llevar a cabo el proceso constructivo o no toma en cuenta las normas que apliquen según el tipo de proyecto, existirá mayor incertidumbre durante el proceso constructivo y un menor control.

Las actividades que componen el proceso constructivo también se deben estudiar conforme a las normas aplicables, y al complementar este estudio con una estricta inspección estructural de los elementos, basado en los planos constructivos y especificaciones técnicas, se abre camino hacia la obtención de un producto de la calidad requerida.

Para asegurar la integridad y el funcionamiento adecuado de la estructura, todos los ingenieros involucrados en el proyecto deben generar criterio técnico propio sobre las actividades que no se les asignó ejecutar directamente. En este caso Constructora MECO estuvo a cargo de la construcción del puente, pero fue necesario realizar el análisis estructural de la cercha para determinar el comportamiento de deflexiones que asegurara que el puente es apto. Con lo cual se estableció un parámetro para comparar los resultados obtenidos durante el proceso constructivo.

El objetivo del proyecto es analizar los aspectos relacionados con el plan de construcción y proceso constructivo del puente para lograr la convergencia entre el diseño y la ejecución. Se realizaron los estudios mencionados en cuanto a factibilidad constructiva y cumplimiento de normas, y se complementan con la inspección estructural de pilotes y bastiones. Además, se efectúa el análisis estructural de la cercha metálica para establecer el valor teórico de deflexión, con el cual se pueden evaluar los resultados prácticos obtenidos en el proceso constructivo.

Agradecimientos

El agradecimiento especial es para mis padres, por el gran esfuerzo que han hecho durante todos mis años de educación y por su apoyo incondicional hasta la culminación de mis estudios de educación superior.

Se agradece a los ingenieros de Constructora MECO, Ing. Ronald Castillo por la anuencia mostrada para que este proyecto fuera posible, así como su disponibilidad, y al Ing. Yohel Bolaños por toda la ayuda y guía ofrecidas durante el desarrollo del proyecto. También se agradece al Ing. Jorge Burgos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por el interés mostrado en mi trabajo.

Se agradece al profesor, el Ing. Hugo Navarro, por su labor guía durante el desarrollo de este documento.

Y a todas las personas que de alguna forma me apoyaron a lo largo de estos cinco años en el Tecnológico de Costa Rica.

Resumen ejecutivo

En este documento se desarrollan las actividades ejecutadas para lograr la convergencia entre el diseño y la construcción del puente para paso elevado sobre río Aguacaliente, que sirve de apoyo a una tubería del acueducto Orosi. Teniendo en cuenta el impacto a nivel nacional que representa el acueducto, es necesario analizar los aspectos relacionados con el plan de construcción y proceso constructivo del puente para asegurar su integridad estructural en la fase de operación.

También, como valor agregado se generaron propuestas de mejoramiento y recomendaciones para tener en cuenta a futuro, basadas, tanto en la explicación teórica como en lo observado en la práctica durante el desarrollo del Trabajo Final de Graduación. Con esto se puede comprender el por qué hacer algo y para qué hacerlo.

A la Unidad de Puentes de Constructora MECO, al especializarse en este tipo de obras, le será de gran ayuda para los futuros proyectos tener presente los resultados, análisis y recomendaciones aquí presentes, los cuales se basan mayormente en la División 550 del Manual CR-2010, normativa de acatamiento obligatorio en la construcción de puentes en nuestro país. También se estableció como marco de referencia los documentos oficiales de uso recurrente en este tipo de proyectos, tales como el Código Sísmico de Costa Rica 2010 revisión 2014 y normas emitidas por entes internacionales como el American Concrete Institute y American Society for Testing and Materials.

Para este proyecto en específico, se determinó la factibilidad constructiva de los procedimientos de los planes de construcción y la calidad del proceso constructivo, según las normas que se aplican a cada actividad ejecutada.

Adicionalmente, basado en planos y especificaciones del proyecto y mediante visitas periódicas al campo, se llevó a cabo el control de calidad e inspección estructural del proceso constructivo del puente, factores directamente

relacionados con la integridad estructural y el comportamiento real vs diseñado. Se buscó reforzar la inspección de campo de manera estricta y minuciosa, respondiendo a una de las necesidades más comunes a suplir cuando se analizan las razones de la falla de una estructura.

El montaje de la estructura metálica representa la ruta crítica y el proceso más complejo del proyecto, por tanto, lo más idóneo es que todos los profesionales involucrados generen su criterio técnico propio de este proceso. En vista de que la empresa diseñadora no dio a conocer los valores de deflexión hasta meses después de la orden de inicio, se determinaron las deflexiones esperadas en diferentes escenarios durante la fase de carga al puente con el uso del software Autodesk Robot. Esto sirvió de herramienta para identificar posibles valores inesperados de deformación y se hizo posible establecer un valor estándar con el cual comparar los valores obtenidos en campo, y así evaluar las actividades del proceso constructivo relacionadas con la estructura metálica.

De este modo se genera un aporte mediante las técnicas mencionadas, con el propósito de conservar el óptimo funcionamiento de la tubería para beneficio de 700 mil personas en la Gran Área Metropolitana (GAM).

Como resultados principales se destacan el cumplimiento en gran medida de las normas mencionadas en el desarrollo del documento en relación con las actividades del proceso constructivo, así como el seguimiento casi en su totalidad de los planos constructivos de pilotes y bastiones.

Los cambios en dimensiones de pilotes y bastiones se debieron principalmente a actualizaciones en los planos y situaciones acontecidas durante la ejecución.

Se plantearon propuestas de mejoramiento de algunos planes de construcción, con el fin de respetar la totalidad de las normas en tareas posteriores de este proyecto y en procesos constructivos de futuros proyectos.

Finalmente, el montaje y proceso de carga de la cercha se llevó a cabo de manera satisfactoria,

puesto que el comportamiento de dicha estructura fue congruente con lo anticipado en el software Autodesk Robot. Se identificaron las fuentes de incertidumbre que influyeron en los datos obtenidos de campo en comparación con los del software.

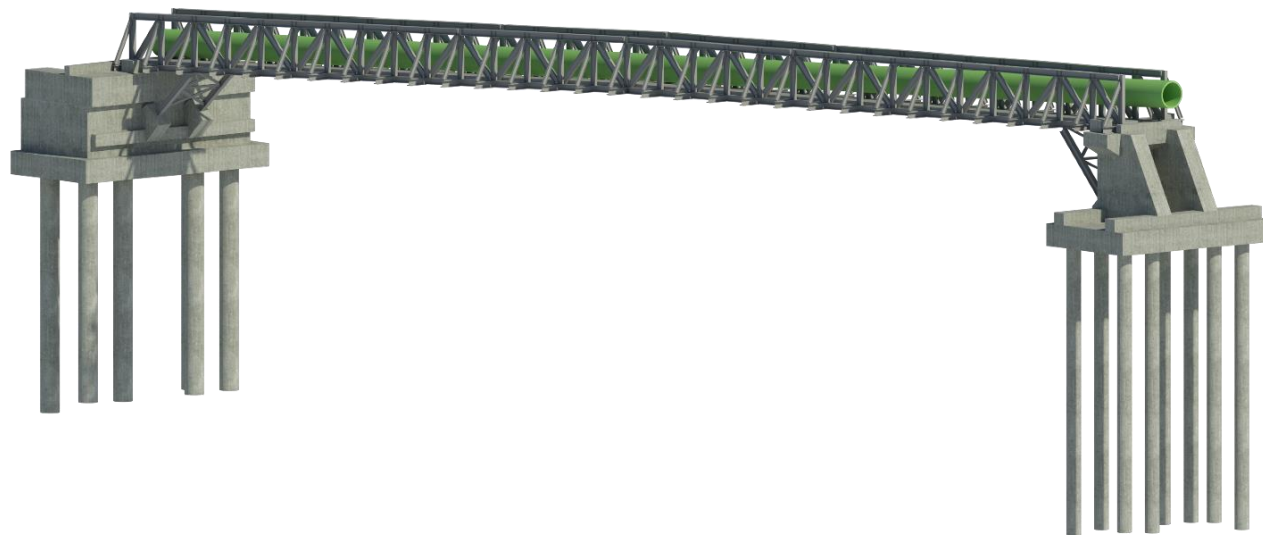


Figura 1. Puente para paso elevado sobre río Aguacaliente ejecutado por Constructora MECO. *Elaborado con Autodesk Revit.*

Introducción

El nuevo puente tipo cercha de 64,42 metros de longitud que Constructora MECO edificó sobre el río Aguacaliente, soporta una tubería del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). La tubería en cuestión es parte del Acueducto Orosi, que abastece de agua potable a 700 000 personas del Gran Área Metropolitana (GAM). Específicamente pertenece a la Obra 1 del Acueducto Orosi, que conduce agua desde el embalse El Llano hasta la planta de tratamiento de agua potable Planta Alta en Tres Ríos.

La ejecución de esta obra nace a raíz de la vulnerabilidad que presentaba la tubería ante la acción del río Aguacaliente durante eventos naturales tipo tormenta de gran magnitud. Tal fue el caso de la tormenta Thomas en 2010, que ocasionó el desbordamiento del río y resultó en la falla estructural de una de las columnas que daban soporte a la tubería.

Debido a la importancia que representa esta tubería a nivel país, y según lo estipulado por el AyA, el puente era necesario para liberar dicha estructura de toda vulnerabilidad provocada por el río. Por lo anterior, se identifica el problema como la vulnerabilidad que presenta la estructura sobre la cual se apoyaba la tubería antes de la intervención.

Teniendo en cuenta el impacto a nivel nacional que representa el acueducto, la finalidad del proyecto es analizar los aspectos relacionados con el plan de construcción y proceso constructivo del puente para lograr la convergencia entre el diseño y la ejecución. Se estudia el proceso en cuanto a factibilidad constructiva y cumplimiento de normas, y se verifica el cumplimiento de planos y especificaciones técnicas mediante la inspección estructural de pilotes y bastiones. Además, se efectúa el análisis estructural de la cercha metálica para establecer el valor teórico de deflexión, con el cual se pueden evaluar los resultados prácticos obtenidos en el proceso constructivo.

Basado en la información obtenida durante el desarrollo del proyecto, se generan propuestas de mejoramiento de procesos constructivos que sirven

para los futuros proyectos de construcción de la Unidad de Puentes de Constructora MECO.

Para este análisis fue necesario consultar normas y manuales aplicables a proyectos de construcción de puentes y estructuras de concreto reforzado en Costa Rica, como el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 (de ahora en adelante CR-2010), el Manual de inspección de puentes del MOPT, el Código Sísmico de Costa Rica 2010 revisión 2014, de ahora en adelante CSCR-2010(14), y normas emitidas por entes como el American Concrete Institute y American Society for Testing and Materials (ASTM).

Objetivo general

Analizar el plan de construcción y el proceso constructivo del puente tipo cercha que sirve de apoyo a la tubería que abastece a la planta de tratamiento de agua potable del Acueducto Orosi, para la convergencia entre el diseño y construcción del proyecto a ejecutar por Constructora MECO en una finca propiedad del AyA.

Objetivos específicos

- Estudiar los procedimientos presentes en el plan de construcción y las tareas ejecutadas durante el proceso constructivo en cuanto a factibilidad constructiva y el cumplimiento de normas.
- Verificar el cumplimiento de los planos y especificaciones técnicas en la construcción de pilotes y bastiones de la subestructura.
- Analizar el comportamiento de la estructura de cercha durante la fase de carga y en la fase de operación.

Marco Teórico

Con el fin de brindar sustento teórico al documento y dar contexto en cuanto al tema desarrollado, en este capítulo se definen conceptos en materia de puentes, inspección y análisis estructural.

Componentes del puente en cuestión

Superestructura

Se conforma de todos los componentes estructurales que se ubican sobre los apoyos del puente, y que por lo tanto reciben directamente las cargas producto del uso de la estructura, tales como vigas, cerchas, arriostres y losas. La superestructura es la encargada de transmitir las cargas producidas por vehículos, peatones y distintos materiales (en el caso de tuberías) a la subestructura del puente.

Cercha

Estructura formada por elementos capaces de soportar cargas, dispuestos en un arreglo triangular y que a su vez están unidos por soldadura, placas o pernos dependiendo del material utilizado. La superestructura tipo cercha presenta dos cerchas o armaduras que están unidas por medio de un sistema de arriostres, vigas, diafragmas y/o portales.

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) (2007) clasifica los tipos de cercha:

- Paso inferior: el paso se da por debajo del sistema de arriostreamiento superior que une ambas cerchas.
- Paso superior: el paso se da por encima de la cercha.

- De media altura: es una cercha de paso inferior, que no presenta arriostres superiores.

Arriostres

Son los elementos de una estructura encargados de proveer estabilidad lateral y disminución de deformaciones ante las cargas externas, en el caso de la superestructura tipo cercha los arriostres también cumplen la función básica de unir ambas armaduras.

Subestructura

Se conforma de todos los componentes que están por debajo de la superestructura, los cuales transmiten los esfuerzos provenientes de esta última hasta el terreno sobre el cual se cimienta el puente. Está compuesto por los apoyos, pilas, bastiones y fundaciones.

Apoyos

Los apoyos transmiten las cargas de la superestructura a los elementos de la subestructura sobre los cuales se encuentren posicionados, como los bastiones. Además, los apoyos determinan los grados de libertad ya que dependiendo de las características que el apoyo presente, restringen la traslación y/o rotación (MOPT, 2007).

A continuación, se menciona el tipo de apoyo empleado en el puente del proyecto:

- Placas de apoyo: consisten en piezas de acero rectangulares apernadas y soldadas, su función es unir el bastión con los elementos de la cercha. Los pernos están empotrados en el bastión y unidos por contacto con la placa de apoyo inferior, después se coloca la placa de neopreno y sobre esta última la segunda placa de apoyo.

Mediante el uso de tuercas y soldadura se une la placa superior a la cercha.

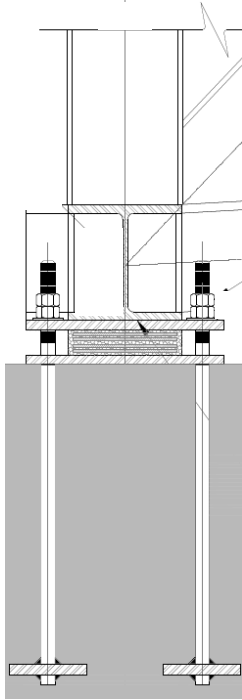


Figura 2. Placa de apoyo utilizada en el puente sobre Río Aguacaliente.
Fuente: AyA. (2021).

Bastiones

Estructuras que se encuentran a cada extremo del puente, sobre estos se apoya la superestructura y llevan las cargas directamente al terreno. Los bastiones están en contacto directo con el material de relleno en los extremos del puente, por lo que deberá ser diseñado para resistir tanto las cargas verticales de la superestructura y usuarios, como las cargas laterales provenientes de dicho material de relleno.

- Pedestal: superficie del bastión sobre la cual se coloca el apoyo.
- Cuerpo principal: es el principal componente del bastión, pueden ser muros, columnas, contrafuertes.
- Placa de fundación: estructura de soporte en conjunto con el suelo o roca soportante. Para que se clasifique como superficial, debe cumplir con la relación:

$$\frac{D_f}{B} \leq 1$$

D_f = nivel de desplante

B = ancho del cimiento

(Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2002).

Los dos tipos de bastiones que se presentan en el proyecto son:

- Tipo Contrafuerte: consiste en un bastión compuesto por un muro o cuerpo principal el cual es apoyado por muros perpendiculares en forma de cuña, además posee una placa de fundación.
- Cabezal sobre pilotes: este bastión consiste en una viga cabezal que se construye sobre una o varias filas de pilotes, por lo que el acero vertical del pilote se ancla a esta viga.

Pilotes preexcavados

Los pilotes preexcavados y colados en sitio son estructuras de concreto reforzado de forma cilíndrica, que requieren de una excavación previa al colado hasta llegar al estrato requerido según el estudio de suelos previo. Es un tipo de cimentación profunda empleado para llevar las cargas de la estructura a estratos que presenten características geomecánicas competentes consecuentes con los requerimientos específicos de cada proyecto.

El proceso constructivo de estos se compone de la preparación de la zona de trabajo, replanteo en sitio con topografía, perforación en el terreno, confección y colocación de la armadura en la perforación, colado del concreto y el descabezado de los pilotes.

Accesorios

Dentro de los accesorios que se presentan en una estructura como la que se estudia están:

- Placas de unión: elementos rectangulares de acero que son empleados para unir dos perfiles metálicos contiguos de la cercha con el uso de pernos.
- Pasarela: espacio destinado para el tránsito de peatones, ubicado a un costado del puente en sentido longitudinal.
- Barandas: tubos metálicos que cumplen la función de brindar seguridad al usuario que camine por la pasarela.

Inspección

La inspección consiste en las distintas técnicas empleadas para efectuar la revisión de las estructuras que se construyen en obra, estas se comparan con los planos constructivos y lo estipulado en las especificaciones técnicas del proyecto, así como también se ejecuta para verificar que el proceso constructivo sea acorde con el plan de construcción.

Durante el proceso de inspección también se revisa la calidad de los materiales que serán empleados para la construcción de la estructura y el manejo de estos en obra, tales como el concreto y el acero de refuerzo.

Concreto Hidráulico

Es un material compuesto por agregados pétreos finos y gruesos (arena y piedra respectivamente), conglomerados por una matriz cementante llamada pasta de cemento, la cual se forma por la reacción exotérmica de hidratación del cemento hidráulico con el agua. La principal característica mecánica del concreto es la resistencia a la compresión y que gracias a su fluidez en estado fresco, permite construir todo tipo de elementos mediante el uso de formaletas.

Revenimiento

También conocido como asentamiento del concreto, es una medida de la trabajabilidad y consistencia que posee una mezcla de concreto hidráulico en estado fresco. El procedimiento de esta prueba en campo está estandarizado por la norma ASTM C143.

Para esto se toma una muestra de concreto fresco y se introduce en tres capas en el molde (cono de Abrams). Después de colocar una capa se compacta con varilla 25 veces y se procede a colocar la siguiente capa. Una vez moldeado el concreto en el cono de Abrams, este último se retira verticalmente y se mide la altura entre la posición original del concreto (parte superior del molde) y la posición actual después de quitar el molde.

Temperatura

La medición de temperatura se realiza con el fin de llevar control del concreto en estado fresco y prevenir variaciones no deseadas en su comportamiento y en resultados finales.

La temperatura en la mezcla de concreto incide en el revenimiento, tiempo de fraguado, porosidad, resistencia a la compresión e inclusive en la aparición de fisuras.

Según la norma ASTM C1064, se coloca un dispositivo de medición en el concreto y se sumerge al menos 3 pulgadas, después se presiona suavemente el concreto alrededor del dispositivo para asegurarse de que no queden espacios vacíos y se hace la lectura como mínimo dos minutos después de haber introducido el dispositivo.

Resistencia a la compresión

Es la capacidad del material de soportar esfuerzos de compresión sin fallar, esta dependerá de los requerimientos de diseño estructural especificados según el uso que se le vaya a dar al elemento. La resistencia mínima a la compresión a los 28 días de edad se le conoce como f'_c , la cual se mide mediante la norma ASTM C39.

Para esta norma ASTM (2021) indica que se ensayan especímenes cilíndricos o núcleos de alguna estructura existente de 150x300 mm o 100x200 mm, mediante la aplicación de fuerza de compresión en dirección axial. El resultado es la división de la máxima carga obtenida en un espécimen por el área de sección transversal promedio de espécimen. Para obtener la curva de desempeño del concreto se deben ensayar especímenes a tres edades distintas.

Crosshole

El método de ensayo ultrasónico Crosshole Sonic Loggin se emplea para revisar la integridad y homogeneidad del concreto una vez construido el pilote preexcavado, y así identificar zonas con menor calidad como concreto contaminado con suelo. Para esto se instalan ductos paralelos de acero en sentido longitudinal de la armadura

previo al colado, posteriormente estos ductos se llenan con agua.

El ensayo consiste en introducir dos sensores (hidrogeófonos) hasta el fondo e ir subiéndolos por los ductos hasta sacarlos completamente. A medida que los sensores ascienden, uno envía pulsos ultrasónicos a través del concreto del pilote y otro los recibe, estas señales son enviadas a la computadora a la cual están conectados. De esta manera se mide la velocidad de onda en el concreto, y en la computadora se generan gráficos de Profundidad vs Tiempo y de Amplitud vs Tiempo.

ASTM (2017a) en su norma D6760-16 estandariza el procedimiento con requerimientos y consideraciones mínimas para este ensayo, en esta se especifican distintas configuraciones de ductos dependiendo del diámetro del pilote. Cabe mencionar que debido a la naturaleza del ensayo, este no es capaz de detectar bulbos (aumentos de diámetro), pero sí cuellos (MYV Soluciones Geotécnicas S.A., 2021a).

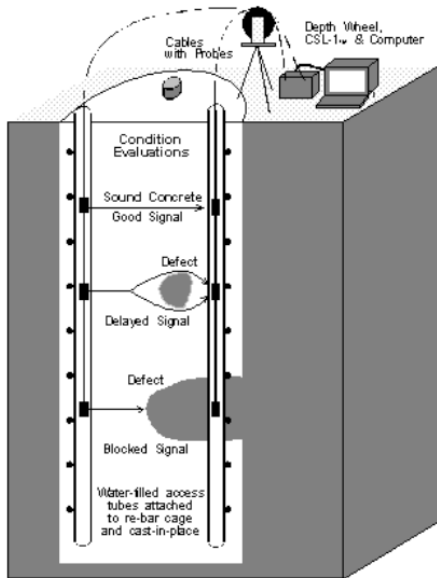


Figura 3. Esquema general del ensayo Crosshole.
Fuente: MYV Soluciones Geotécnicas S.A. (2021a).

P.I.T

El Pile Integrity Test (P.I.T) se aplica en pilotes para evaluar la integridad en toda su longitud, ya que se estudia la continuidad del concreto del pilote y se detectan posibles anomalías como

cambio de sección y de peso específico. Este método también puede aplicarse en pilotes de acero sin relleno y perfiles H.

El procedimiento estandarizado está estipulado por ASTM (2016) en su norma D5882-16, consiste en instrumentar la cabeza del pilote con un acelerómetro de alta sensibilidad (el cual se adhiere con un material como cera, grasa vegetal o vaselina) y se impacta el concreto con un martillo también instrumentado y la información se envía a una computadora.

Los golpes generan ondas a lo largo del pilote las cuales se reflejan al encontrar anomalías, gracias a que se conoce la velocidad de propagación de onda en el concreto y el tiempo transcurrido entre el golpe y la señal producto de la reflexión, se puede localizar las anomalías y la punta del pilote (MYV Soluciones Geotécnicas S.A, 2021c).

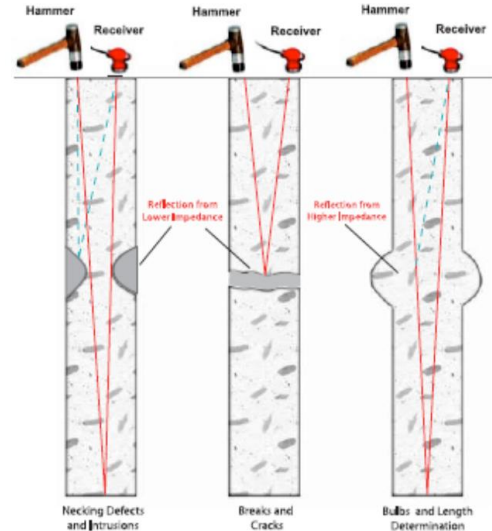


Figura 4. Esquema general del ensayo P.I.T.
Fuente: MYV Soluciones Geotécnicas S.A. (2021c).

Acero de refuerzo

Estas barras son empleadas en las estructuras de concreto reforzado para suplir la baja resistencia a la tensión por parte del concreto. Es necesario el uso de acero de refuerzo cuando los elementos se ven sometidos a esfuerzos de tensión y flexión, sin embargo, este también aporta resistencia al cortante y a la compresión, además de que otorga confinamiento al elemento para la conservación de su integridad. Por tal motivo, existe una cantidad

de acero mínimo para todos los elementos de concreto reforzado.

Longitud de desarrollo

Es la longitud mínima que debe tener una varilla embebida en el concreto para poder desarrollar toda su capacidad a tensión por adherencia, y así el acero falle antes que el concreto.

Detallado empleado en el puente:

Las especificaciones técnicas de este proyecto dictaron que en la construcción de pilotes y bastiones se debía utilizar un traslape mínimo de 60 diámetros de varilla, acorde con el artículo 7.6.2(F) de la división 1-A “Diseño Sísmico” de AASHTO 2010.

Además, los detalles de doblaje en planos se hicieron según el artículo 7.6 “Requerimientos para el diseño de concreto reforzado para categorías C y D” de la división 1-A “Diseño Sísmico” de AASHTO 2010.

Detallado según el CSCR-2010(14), para refuerzo longitudinal:

Longitud de gancho estándar:

El refuerzo superior e inferior que termine en un núcleo de unión, deberá presentar un gancho estándar extendiéndose un valor “lag”, desde el inicio del núcleo en dirección a la cara opuesta de este. Después se efectúa un doblaje a 90 grados.

En barras de #3 a #11, para calcular la longitud de anclaje para ganchos requerida, se escoge el mayor de:

$$l_{a_g} = 8\phi_b$$

$$l_{a_g} = 15 \text{ cm}$$

$$l_{a_g} = \frac{f_y \phi_b}{16 \sqrt{f'_c}}$$

Para calcular la longitud de anclaje para ganchos disponible:

$$l_{a_g} = \text{ancho columna} - 5 \text{ cm}$$

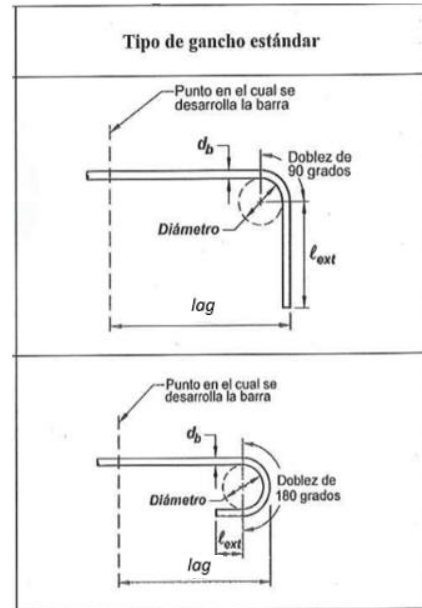


Figura 5. Gancho estándar "lag".
Fuente: adaptado de ACI 318 (2019).

Longitud de extensión después de doblaje:

Es la longitud mínima que debe extenderse una varilla después de presentar un doblaje.

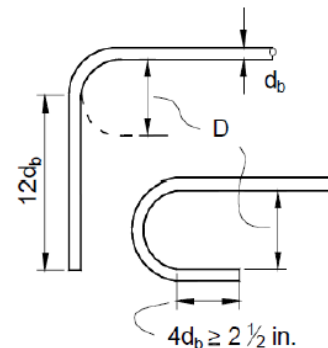


Figura 6. l_{ext} de armadura principal según CSCR-2010(14).
Fuente: Navarro, H. (2020).

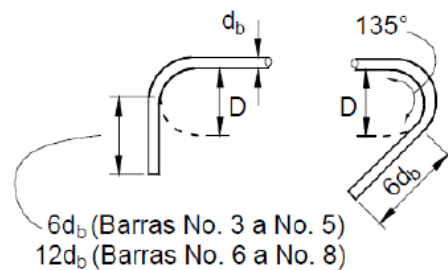


Figura 7. l_{ext} de estribos según CSCR-2010(14).
Fuente: Navarro, H. (2020).

Longitud de anclaje para barras rectas:

Es la longitud mínima de traslape entre dos varillas y también es la longitud que una varilla debe extenderse después del punto de inflexión del diagrama de momentos del elemento estructural (cuando este cambia de signo).

- Barras inferiores

$$l_{a_r} = 2,5l_{a_g}$$

- Barras superiores

$$l_{a_r} = 2,5l_{a_g}$$

- Para vigas con más de 30 cm de concreto por debajo de las barras superiores

$$l_{a_r} = 3,5l_{a_g}$$

Análisis Estructural

Es una parte de la rama estructural de la Ingeniería Civil que estudia el comportamiento de las estructuras ante la acción de cargas externas, llamadas solicitaciones. Lo anterior se logra mediante métodos matemáticos y en muchos casos, empleando software de modelado y análisis estructural.

Producto de este análisis se determinan las reacciones en los apoyos de una estructura, sus fuerzas internas que la mantienen en equilibrio, desplazamientos de la estructura, deflexiones de los elementos que la componen, modos de vibración y demás información útil para el diseño y la revisión del diseño.

Deformación

Navarro (2018) define la deformación como el cambio de longitud de un elemento por el efecto de las fuerzas que actúan sobre este.

Flecha

La flecha o deflexión, es la deformación vertical o perpendicular al eje longitudinal del elemento que se presenta en un punto de este, debido a la

acción de las cargas externas. Se da en vigas por esfuerzos de flexión y cerchas por acción de las cargas axiales en los elementos que la componen.

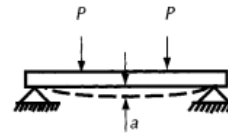


Figura 8. Deflexión de un elemento viga.

Fuente: González, O. y Robles, F. (2005).

Contraflecha

Es una deformación convexa inducida previa a la fase de operación de la estructura, va en dirección contraria a la deflexión esperada cuando se apliquen las cargas externas.

Esta se puede obtener en elementos de concreto gracias al pretensado y en elementos metálicos como cerchas, en su proceso de confección en el taller.

Método Energético: Trabajo Virtual

Se emplea para calcular deflexiones y rotaciones, además de que puede utilizarse para generar ecuaciones adicionales para resolver sistemas hiperestáticos.

La ecuación general es:

$$(1)\Delta = \sum \frac{FfL}{AE} + \sum \int_0^L \frac{Mm}{EI} dx$$

Sin embargo, para su aplicación en armaduras donde sus elementos están sometidos a carga axial por cargas aplicadas en sus nodos se cumple:

$$(1)\Delta = \sum \frac{FfL}{AE}$$

Donde:

- F: cargas axiales debido a la aplicación de fuerzas externas en la armadura.
- f: cargas axiales debido a la fuerza virtual unitaria.
- L: longitud de cada elemento.

- A: área de sección transversal del elemento.
- E: módulo de elasticidad del material de la cercha.

Navarro (2017) indica que si una armadura está sometida a la acción de las cargas P y se desea calcular el desplazamiento vertical en el nodo $L1$. Se supone una carga unitaria vertical que actúa en el nodo $L1$, como se muestra en la figura (b).

La deflexión debida a las cargas P , se puede calcular mediante el principio del Trabajo Virtual, con la ecuación para armaduras, donde F son las cargas axiales en cada uno de los elementos debido a las cargas P , y f son las cargas axiales generadas por la carga unitaria 1.

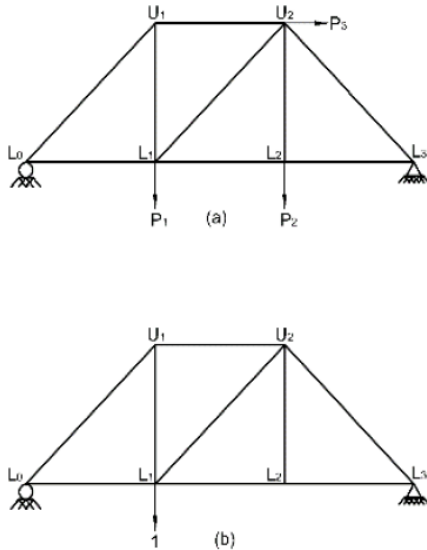


Figura 9. Aplicación de cargas por Trabajo Virtual.
Fuente: Navarro, Á. (2017).

Metodología

Estudio de plan y proceso constructivo

Antes del inicio del proyecto de construcción del puente, se solicitó el material e información relacionada con la ejecución para estudiar los distintos documentos que comprenden el plan de construcción y planos, así como las especificaciones técnicas del proyecto y especificaciones técnicas generales del AyA, con el fin de familiarizarse con el proceso que se llevaría a cabo.

Se evacuaron las dudas que surgieron de la revisión de la información recibida mediante consultas a los profesionales involucrados en el proyecto.

Se realizaron visitas al lugar de la obra durante todo el desarrollo del proyecto para obtener información de primera mano acerca de cada una de las fases de la construcción del puente (decisiones tomadas, razones por las cuales se tomaron e implicaciones).

Posteriormente se hizo lectura del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010, así como la norma de Requisitos de reglamento para concreto estructural ACI 318-19 en los capítulos relacionados con cada situación en donde se requirió analizar algún ítem del plan de construcción y del proceso constructivo.

Se estudió el contenido del plan de construcción y los acontecimientos vistos en campo en relación con la literatura para señalar aciertos y fallas del proceso. De esta manera se identificaron opciones de mejora basado en los requisitos de las normas aplicables a la construcción de puentes y estructuras de concreto reforzado.

Tomando como insumo el punto anterior, se desarrolló una propuesta de mejoramiento en materia del flujo perforación-colado de pilotes y

otra en relación con el izado de armaduras de pilotes.

Se analizó detalladamente el proceso constructivo del puente en cuanto al cumplimiento de los requisitos que aplican a cada situación de este proyecto.

Inspección estructural de pilotes y bastiones

El primer paso para la inspección de pilotes y bastiones consistió en estudiar los planos constructivos y especificaciones técnicas de dichos elementos, con el fin de entender el proceso y aclarar cualquier duda o aspecto que no estuviera clara en la documentación. A su vez, se hizo lectura de proyectos de graduación, manuales de inspección e información en general que tratan el tema de verificación de la construcción de puentes y estructuras de concreto reforzado.

Posteriormente, se resumió la información aplicable al proyecto en cuestión para su revisión y se presentó en forma de hojas de verificación. Estas contemplan todos los puntos que se consideren necesarios por el autor y profesionales involucrados en el proyecto. Se mencionan el ID del elemento, dimensiones en plano, dimensiones reales, especificaciones indicadas para materiales, uso de refuerzo indicado, cumplimiento con normas presentes en especificaciones y todo lo directamente relacionado con la construcción de la subestructura.

El plan de inspección toma en cuenta los requerimientos que manifiestan los profesionales del proyecto y recomendaciones de ingenieros con experiencia en el tema.

Con el propósito de obtener la información según el avance de construcción, se realizaron

visitas a la obra de manera regular durante toda la etapa de ejecución para tomar nota de dimensiones, avances y resultados. Además, se estuvo presente los días de eventos importantes como coladas de concreto de pilotes y bastiones.

Finalmente se presentaron los resultados obtenidos durante la ejecución del plan de inspección en las tablas (hojas de verificación) mencionadas anteriormente.

Comportamiento de la estructura metálica

A continuación, se explican las actividades que se llevaron a cabo para generar el modelo de la estructura y el respectivo análisis de deflexiones. Inicialmente se estudiaron los planos de la estructura metálica y se consultó información importante al AyA respecto a la tubería.

Se generó el modelo de la estructura de cercha en el software de análisis estructural Autodesk Robot Structural Analysis Professional (Autodesk Robot), basado en la información presente en planos constructivos. Para esto se modelaron los perfiles W utilizados en su posición real, considerando la contraflecha inicial de 0,311 m en el punto medio de la cercha y luego se asignaron los apoyos en los extremos de la estructura. Es importante mencionar que se modeló la cercha con los puntales W10X45 y sin estos, con el fin de realizar la respectiva comparación.

Las cargas que actúan sobre la estructura fueron calculadas a mano y se aplicaron al modelo, al contemplar el peso propio de la cercha y la sobrecarga permanente de la tubería, del agua y de los accesorios. La carga temporal de 100 kg/m² estipulada en planos no se consideró para la primera parte del análisis, ya que durante el montaje y demolición no se espera la acción de la carga viva de diseño. Sin embargo, sí es tomada en cuenta para el análisis en la fase de operación.

Posteriormente se propusieron y se representaron tres secuencias de demolición, ya que el plan de construcción actualizado no estipula dicha información. Se conservó la propuesta del plan original de eliminar los cables que dan soporte al punto "B", remover la columna de concreto en el punto "C" y por último remover el pedestal en el punto "D", y además se representaron dos propuestas más.

Se corrió el modelo para cada situación obteniendo el cambio de fuerzas internas y desplazamientos conforme se desarrolla el proceso de demolición. De esto se obtuvo la reducción de la contraflecha una vez cargada con la tubería, al considerar el modelo de la estructura sin los apoyos intermedios existentes. De esta manera se realizó el análisis de deflexiones en software para comparar el resultado de contraflecha final con el inicial, y además contraponer este resultado con lo que sucedió realmente en campo.

A modo de comprobación del modelo, se realizó el cálculo a mano de la deflexión en el nodo central inferior de la estructura sin apoyos intermedios y sin los puntales W10X45, mediante el método energético de Trabajo Virtual para armaduras.

En el análisis de resultados se anotaron las diferencias entre el modelo y la realidad; diferencias en la posición de la tubería al final de la construcción, tomando como referencia el resultado de la reducción de la contraflecha del modelo. Además, se analizaron las implicaciones de los cambios que se han podido generar en la tubería producto del proceso constructivo en comparación al escenario original, y el impacto que podría tener sobre el funcionamiento de la tubería.

Seguidamente, se presenta la secuencia del modelado estructural:

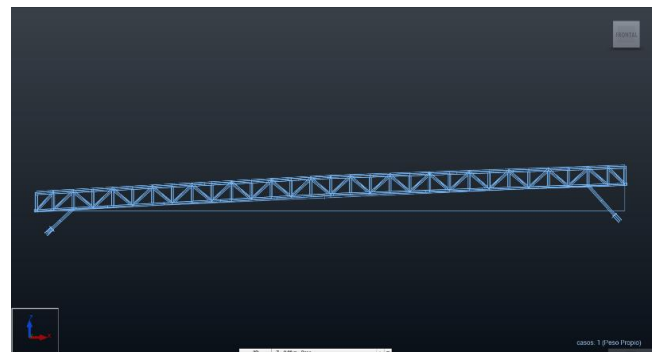


Figura 10. Importación de plano como mapa de planta. Elaborado con Autodesk Robot.



Figura 12. Trazado de líneas de construcción. Elaborado con Autodesk Robot.



Figura 11. Modelado de la estructura metálica. Elaborado con Autodesk Robot.

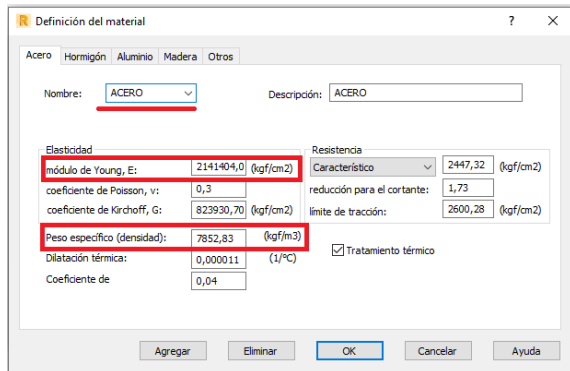


Figura 13. Características del material ACERO. Elaborado con Autodesk Robot.

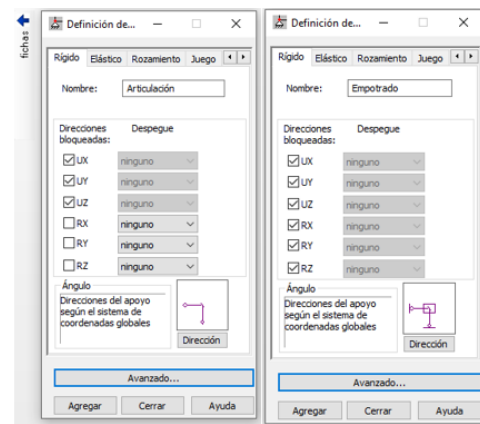


Figura 15. Definición de apoyos. Elaborado con Autodesk Robot.

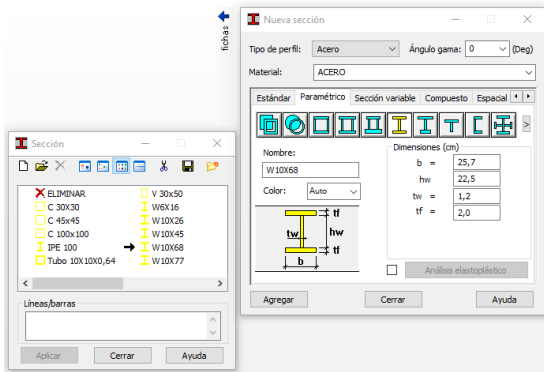


Figura 14. Creación de perfiles de acero. Elaborado con Autodesk Robot.

Se modeló la estructura según planos, con contraflecha inicial de 31,1 cm.

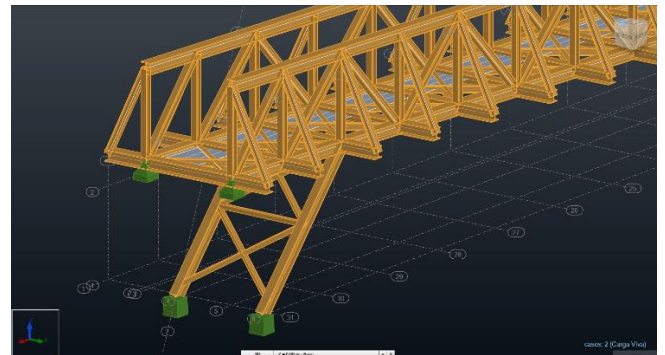


Figura 16. Asignación de apoyos. Elaborado con Autodesk Robot.

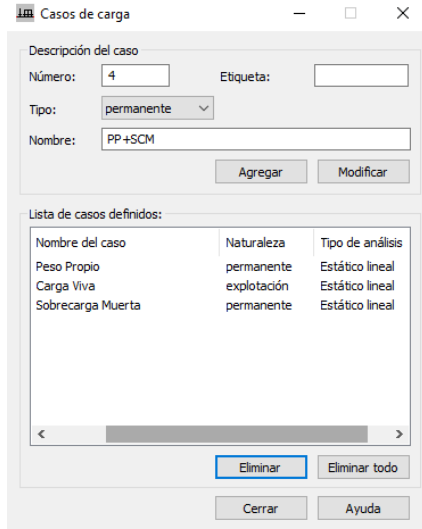


Figura 17. Creación de casos de carga. *Elaborado con Autodesk Robot.*

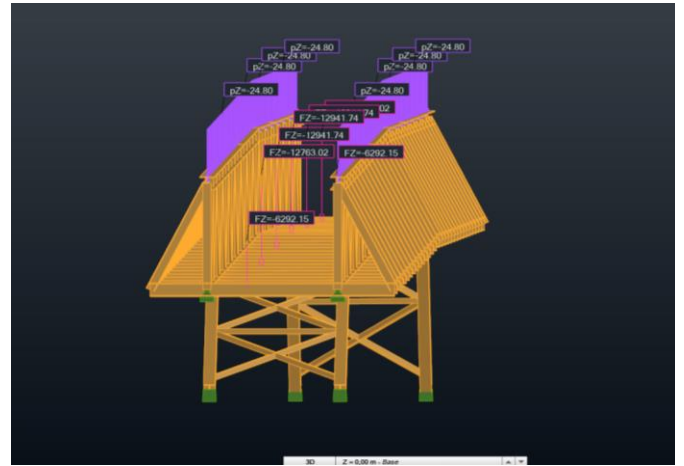


Figura 20. Aplicación de sobrecarga muerta con apoyos intermedios demolidos. *Elaborado con Autodesk Robot.*

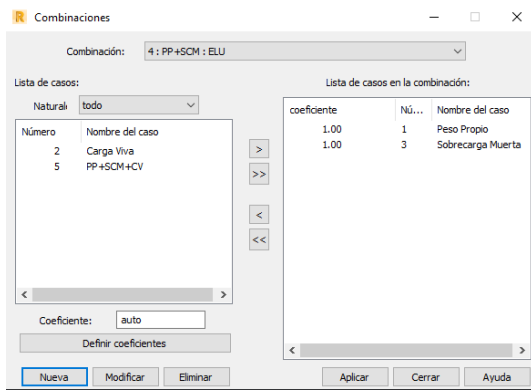


Figura 18. Creación de combinaciones de carga. *Elaborado con Autodesk Robot.*

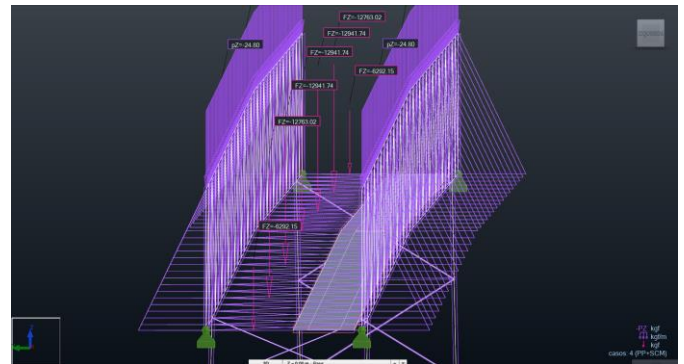


Figura 21. Peso Propio más Sobrecarga Muerta (PP+SCM) con apoyos intermedios demolidos. *Elaborado con Autodesk Robot.*

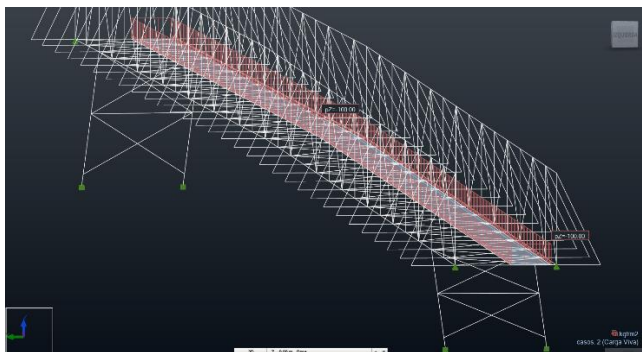


Figura 19. Aplicación de Carga Temporal en Jordomex. *Elaborado con Autodesk Robot.*

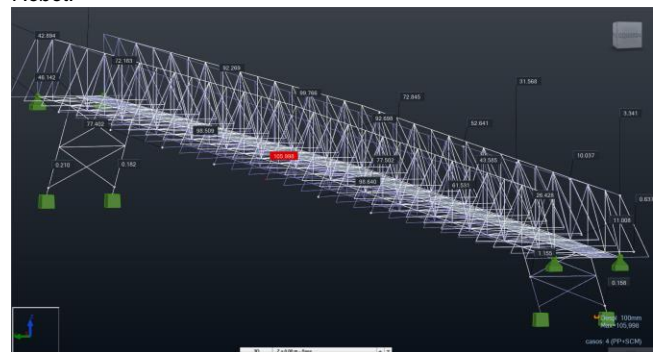


Figura 22. Revisión de deflexiones PP+SCM con apoyos intermedios demolidos. *Elaborado con Autodesk Robot.*

Resultados

Aspectos generales

Ubicación: Cartago, Paraíso, Orosi.
Dirección: Plantel del AyA, frente a la escuela Aguacaliente.

Descripción: Se realizan mejoras a una sección del acueducto Orosi que abastece a 700 mil personas, específicamente en la tubería sobre el río Aguacaliente. Esta será soportada por una estructura metálica apoyada en dos bastiones con pilotes preexcavados. Por lo que se demolerán los apoyos intermedios existentes.



Figura 23. Ubicación del proyecto. Google Maps.

Resultados plan y proceso constructivo

Se analiza la factibilidad de los procedimientos presentes en el plan de construcción y se contraponen con alternativas de mejora. Además, se presenta el análisis del proceso constructivo del puente desde el ámbito estructural y de ejecución.

Basándose en la información obtenida durante el desarrollo de este objetivo, se generan recomendaciones que la empresa pueda emplear en futuros proyectos de construcción.

Esta sección contiene los hechos observados en el proyecto denominado "Mejoras al acueducto de Orosi" que consistió en la construcción de un puente canal para paso elevado sobre el río Aguacaliente. Este se compone de la estructura metálica apoyada sobre dos bastiones y pilotes, para dar soporte a la tubería perteneciente al acueducto en cuestión.

La situación previa a la intervención se representa en la siguiente imagen.

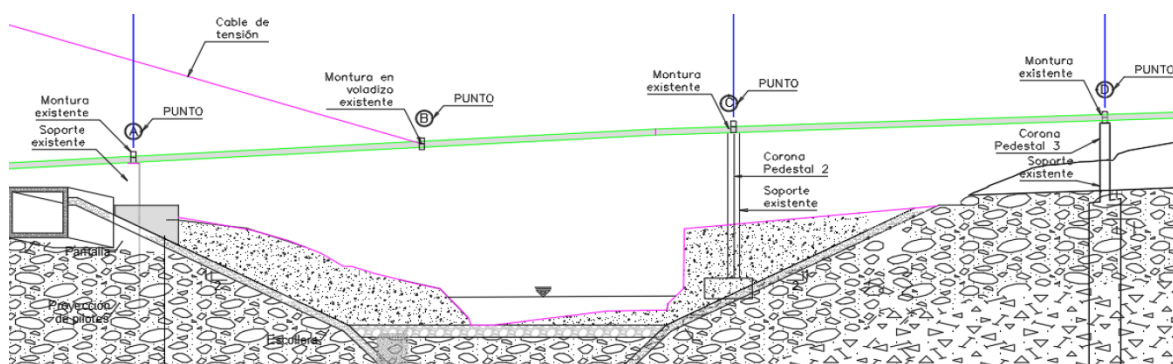


Figura 24. Situación de la tubería previa a la intervención. Plan de construcción MECO.

Se debe poner especial atención a la imagen anterior, puesto que se nombrarán los

nombres de cada punto a lo largo del documento.

- En el margen sur (izquierda), la tubería se encuentra anclada al pedestal de concreto existente "A".
- Mediante una torre con cables se sujeta una montura en el Punto "B", que antes era soportada por un pedestal de concreto.
- En el Punto "C" se encuentra una montura sobre un pedestal de concreto.
- En el Punto "D" se encuentra otra montura sobre el pedestal de concreto mostrado.

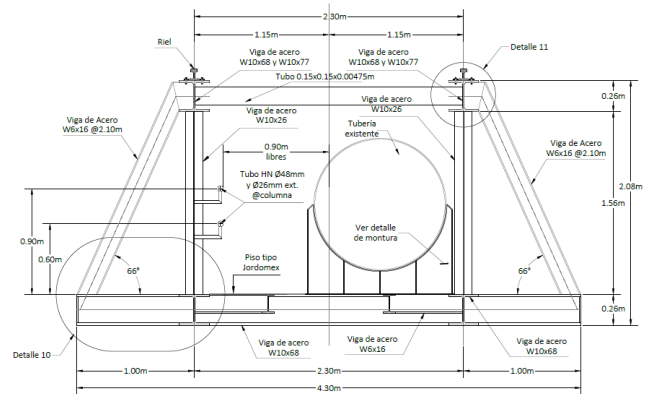


Figura 26. Sección típica del puente construido.
Fuente: AyA. 2021.

La intervención considera:

La construcción de la subestructura compuesta por dos bastiones, uno apoyado sobre 6 pilotes (izquierda) y el otro sobre 8 pilotes (derecha). La subestructura soporta la superestructura metálica, que a su vez sostiene la tubería, sin necesidad de apoyos intermedios.

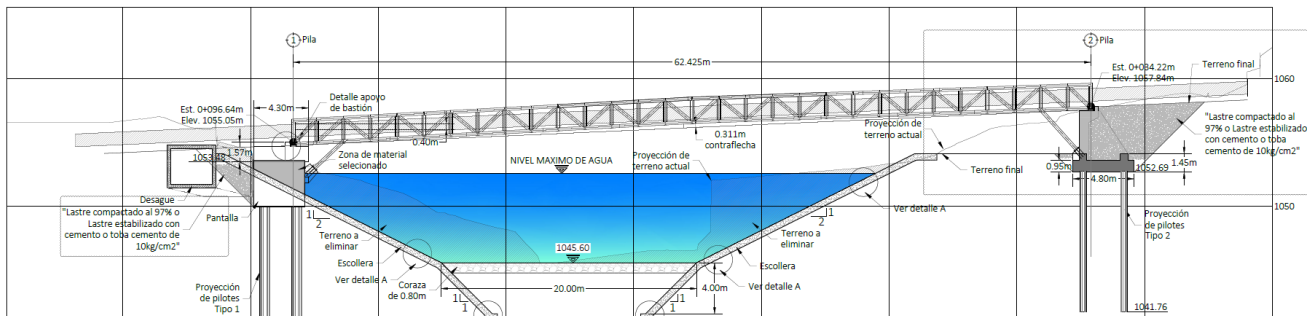


Figura 25. Puente construido para la tubería.
Fuente: AyA. (2021).

Plan de construcción

El plan de construcción del puente se compone del diseño de sitio, planos constructivos producto del diseño, plan de pilotaje y el plan de montaje de la estructura metálica, así como el procedimiento de precarga del puente.

Diseño de sitio

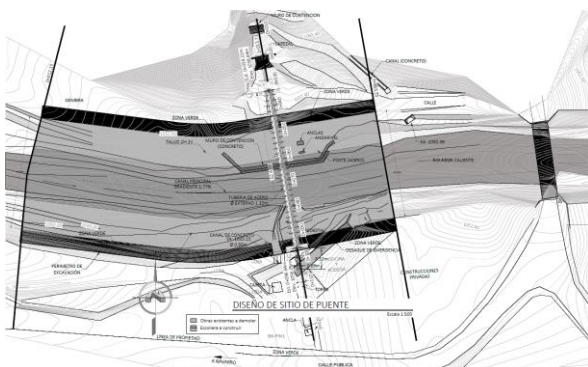


Figura 27. Diseño de Sitio.
Fuente: AyA. (2021).

Planos Constructivos

El diseño del puente estuvo a cargo de una empresa consultora, quienes confeccionaron quince láminas necesarias para la construcción de la estructura.

El contenido de las láminas se muestra a continuación:

- Lámina 1: portada e índice general.
- Lámina 2: planta, elevación longitudinal y sección transversal del puente; y planta de fundaciones.
- Lámina 3: notas generales (especificaciones) y simbología.
- Lámina 4: planta de perforaciones y elevación geotécnica del puente.
- Lámina 5: dimensiones y detalles de refuerzo de Bastión 1.
- Lámina 6: dimensiones y detalles de refuerzo de Bastión 2.
- Lámina 7: elevación longitudinal, planta general y sección típica de estructura metálica; y detalle de vigas.
- Lámina 8: detalles de uniones soldadas de estructura metálica y de anclaje.
- Lámina 9: detalles de uniones soldadas de estructura metálica.
- Lámina 10: detalles de uniones soldadas de estructura metálica.
- Lámina 11: detalles de uniones soldadas de estructura metálica.
- Lámina 12: detalle de apoyo de tubería y detalle de apoyo de puente en bastiones 1 y 2.
- Lámina 13: proceso de montaje de apoyo de puente en bastiones.

- Lámina 14: detalle de pilotes de bastiones 1 y 2.
- Lámina 15: detalles de escollera.

Durante el periodo de ejecución del proyecto, la empresa diseñadora realizó cambios en el diseño. Por este motivo, generaron un juego de planos actualizado de las mismas quince láminas mencionadas.

Actualizaciones de puente contenidas en el nuevo juego de planos

- Se incluyeron puntales de arriostramiento W10X45 a la estructura metálica del puente.
- Adición de elementos de concreto reforzado en Bastión 1 debido a la incorporación de los puntales de arriostramiento: viga intermedia y dos ménsulas.
- Adición de elementos de concreto reforzado en Bastión 2 debido a la incorporación de los puntales de arriostramiento: 2 ménsulas.
- Se agregaron dos ménsulas en el pedestal del Bastión 2.
- Se agregaron dos dados de concreto en pedestal del Bastión 2.
- Se modificaron los dados de concreto en pedestal del Bastión 1.
- Se corrigieron las elevaciones sobre el nivel del mar de ambos bastiones 1 metro más abajo (Bastión 1: 1055,5 m y Bastión 2: 1057,84 m).
- Se agregó la especificación del relleno detrás de los bastiones: material y porcentaje de compactación (lastre compactado al 97%).
- La carga viva se cambió de 415 kg/m² a 100 kg/m².

Errores encontrados en planos durante el proceso constructivo:

- Inicialmente, la Láminas 2 y 4 indicaban las elevaciones de los bastiones con un metro de más. Esto se corrigió en el juego de planos actualizado, sin embargo, tuvo repercusiones que serán abordadas en el Análisis de Resultados.

- Lámina 5 indica 4#6 V-27 en el refuerzo de ménsula en Bastión 1, pero el dato correcto es 4#5 V-27.
- Lámina 6 indica 4#5 V-23 en “Vista frontal refuerzo de bastión 2”, pero el dato correcto es 4#6 W-23.
- El Detalle 16 en Lámina 8 indica puntales W10X49, pero el perfil a utilizar fue W10X45.
- No se incluyó la viga de fundación del Bastión 1 en planos actualizados.
- No se indica el proceso de instalación de pernos de anclaje en las ménsulas.

Plan de pilotaje Geotraesa

Este documento explica el accionar que debieron seguir las empresas para la construcción de pilotes y conseguir los resultados especificados en planos.

El contenido de este plan se explica en el “Proceso Constructivo de Pilotes” en esta misma sección de Resultados, ya que el proceso constructivo de pilotes se ejecutó acorde con dicho documento.

Plan de montaje de estructura metálica

Esta sección del plan de construcción se especificó en el documento designado “Esquemático montaje de puente”, a cargo de las empresas constructoras MECO y STEEL. Como el proceso de montaje se ejecutó siguiendo los lineamientos del documento mencionado, el contenido de este último se desarrolla en el apartado “Montaje de Estructura Metálica del Puente” en esta misma sección de Resultados.

Plan de precarga del puente

Esta sección del plan de construcción se especificó en el documento designado “Procedimiento de precarga del puente de Orosi AyA”, a cargo de las empresas MECO y STEEL.

Como el proceso de precarga se ejecutó acorde con dicho documento, el contenido de este último se explica en el apartado

“Procedimiento de Precarga del Puente” de esta misma sección de Resultados.

Proceso constructivo del puente

Proceso Constructivo de Pilotes

En el Bastión 1 se construyeron seis pilotes de 80 cm de diámetro y 13 m de profundidad. Los pilotes se nombraron como muestra la figura a continuación.

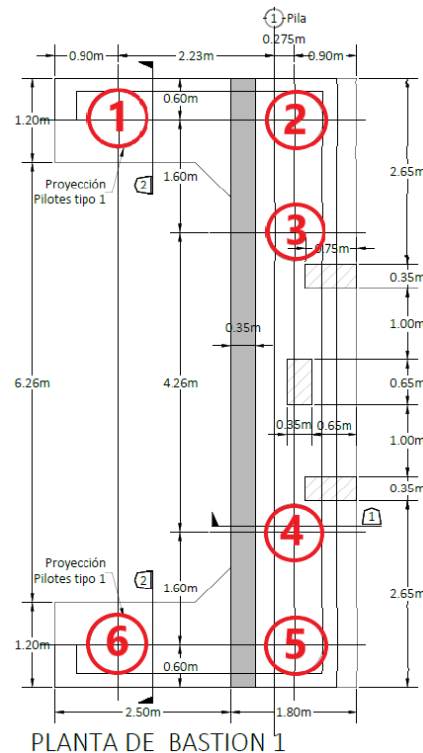
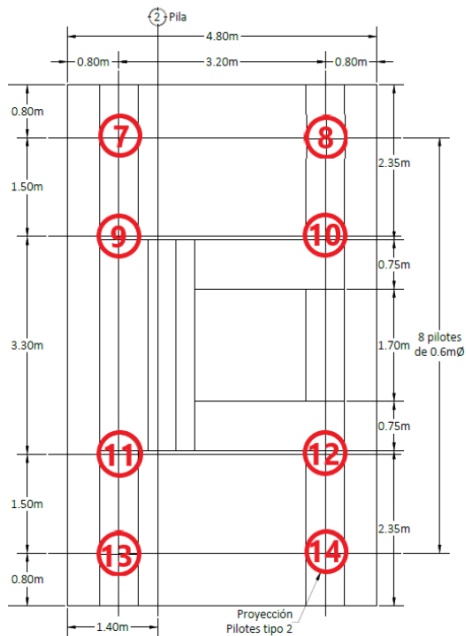


Figura 28. Nombramiento de pilotes Bastión 1.
Fuente: Adaptado de AyA. (2021).

En el Bastión 2 se construyeron ocho pilotes de 60 cm de diámetro y 11 m de profundidad. Los pilotes se nombraron como muestra la figura a continuación.



PLANTA DE BASTION 2

Figura 29. Nombramiento de pilotes Bastión 2.
Fuente: Adaptado de AyA. (2021).

Preparación de la zona de trabajo:

Se hicieron grandes movimientos de tierra en donde la capa vegetal fue removida, posteriormente se niveló el terreno y mediante el uso de maquinaria se proveyó una plataforma de trabajo estable y espaciosa para el accionar de la pilotera. Se dio a conocer las dimensiones de la pilotera a emplear, con el fin de determinar el espacio que se debía proporcionar.

En el terreno donde se construyó el Bastión 2 se movilizó un gran volumen de terreno en comparación con el Bastión 1, pero en este último se dio la necesidad de utilizar maquinaria pesada con martillo hidráulico, con el fin de triturar una losa de concreto existente. Para la preparación de la zona de trabajo en ambos bastiones se hizo uso de una retroexcavadora y una compactadora de rodillo liso, así como el martillo hidráulico mencionado en Bastión 1



Fotografía 1. Preparación zona Bastión 2.



Fotografía 2. Preparación zona Bastión 1.

Replanteo en sitio:

Una vez conformada la plataforma de trabajo, la cuadrilla de topografía realizó el replanteo en sitio de los puntos donde se deben perforar los 14 pilotes que conforman este proyecto, se marcaron los puntos con el uso de estacas

Se debe conocer la cota de elevación a la cual se necesita que estén las puntas de los pilotes, posteriormente, se identifica un punto sobre el nivel de terreno cuya cota sobre el nivel del mar es conocida. A partir de este, topografía determina las elevaciones a las cuales están las estacas donde irá cada pilote. Al restar la cota de elevación de estas estacas con la cota de elevación de la punta del pilote, se obtiene la profundidad exacta que se deberá perforar en cada pilote.

Esta medición se lleva a cabo mediante el uso de equipo electrónico especializado para este fin conocido como Estación total, con un prisma para hacer la lectura. Para esto, la

cuadrilla de topografía se conformó por dos personas, el topógrafo y el ayudante.



Fotografía 3. Estacas en el terreno.

Confección de armadura:

El acero se compró a un proveedor definido, este entregó un certificado que asegura que el cumplimiento de las normas requeridas en el proyecto para acero de refuerzo (ASTM A-706), así como el grado 60 y diámetro de la varilla.

Se dispuso de un espacio en obra destinado para el armado de los pilotes (un espacio a cada lado del río, con la colocación de mantos y plástico para proteger el acero del agua).

Para el armado se contó con una cuadrilla de 10 personas, compuesta por 9 trabajadores y el maestro de obras. Estos se centraron en el armado de todos los pilotes del Bastión 2 y posteriormente confeccionaron las armaduras del Bastión 1.

Durante el proceso de armado se instalaron los tubos para la prueba de integridad Crosshole, esto mediante el uso de varillas curvas soldadas al resto de la armadura para sostenerlos.



Fotografía 4. Armado de pilotes Bastión 2.



Fotografía 5. Armado de pilotes Bastión 1.

Perforación:

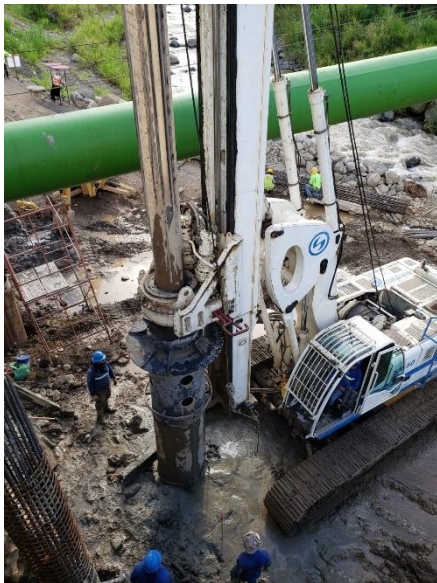
Una vez replanteados los puntos y conocidas las longitudes de perforación, se movilizó la pilotera al sitio de trabajo. Debido al gran tamaño y espacio que esta posee, fue necesario ampliar la excavación de taludes para garantizar un área de trabajo con los radios de giro requeridos por dicha máquina.

La pilotera cuenta con puntas especiales para cada tipo de terreno según el estudio de suelos previo, esta tiene a disposición una punta en forma de tornillo sin fin para suelos, una punta cortadora en forma de cilindro con dientes en su perímetro inferior para cortar roca y una punta limpiadora en forma de valde con cuchillas para ejecutar la limpieza de preparación previa al colado y durante la perforación.

El operario de la pilotera fue el encargado de determinar cuándo utilizar cada punta a medida que se avanzó con la perforación. Es importante recalcar que conforme se vaya excavando, las puntas se llenan de material,

por lo que cada vez que el operario consideró necesario, extrajo el mástil y botó el material afuera de la perforación.

En caso de que el estudio de suelos determine que el terreno es inestable, el CR-2010 indica el uso de lodos minerales (lodo bentonítico, por ejemplo) para la estabilización de las paredes de la perforación durante la excavación. La alternativa a estos lodos que



Fotografía 6. Perforación de pilotes en Bastión 1.

se utilizó, es el encamisado metálico, el cual se compone de cilindros huecos del diámetro requerido y de 3 m de largo. La pilotera los coloca con un movimiento rotacional, para situar la siguiente camisa la pilotera la posiciona sobre la primera y con el movimiento rotacional de su punta empuja ambas hacia abajo.

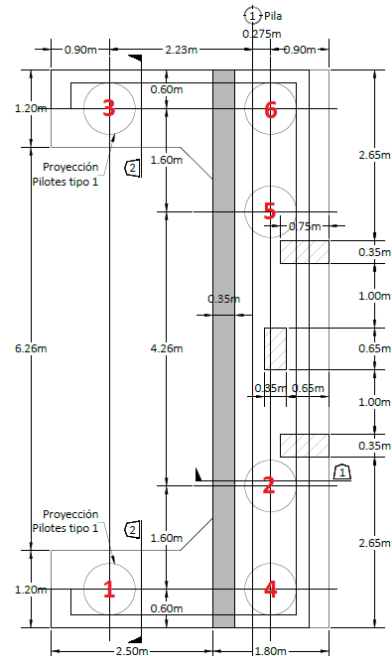


Figura 30. Orden de perforación de pilotes en Bastión 1.
Fuente: Adaptado de AyA. (2021).

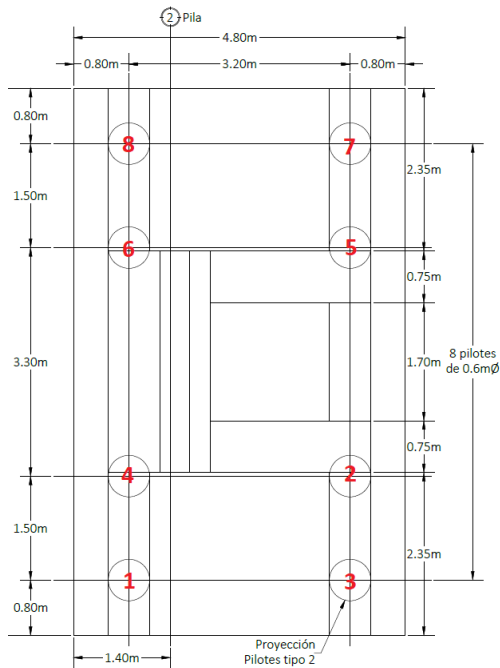


Figura 31. Orden de perforación de pilotes en Bastión 2.
Fuente: Adaptado de AyA. (2021).

Izado de armadura:

Una vez lista y verificada la profundidad de perforación, se prosigue con el izado y colocado de la armadura previamente confeccionada. Este proceso se hizo en primera instancia con la pilotera y después con grúa camión, y cuando fue necesario, la retroexcavadora ayudó a la grúa con el izado para tratar de evitar que la armadura sufriera de flexión excesiva en el centro de su longitud. A pesar de esto, en el izado del Pilote 1 se quebraron los tubos de Crosshole por la flexión que presentó la armadura.

A medida que se introduce la armadura en la excavación del pilote, los ayudantes fueron colocando los espaciadores circulares rotatorios de plástico para garantizar el recubrimiento necesario del pilote. La cuadrilla se compuso por el operario de la pilotera y tres ayudantes de esta, además del operario de la grúa.



Fotografía 7. Izado de armadura de pilote.

Colado de pilotes:

Este proceso se hizo con concreto premezclado de Constructora MECO, el cual fue sometido a pruebas de temperatura y revenimiento del concreto fresco, y posteriormente a pruebas de compresión para garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

Los pilotes del Bastión 1 se construyeron de la siguiente manera:

- Primera etapa: construcción de pilotes bajo nivel de terreno
- Segunda etapa: construcción de pilotes sobre nivel de terreno.

Los pilotes del Bastión 2 se construyeron en su totalidad bajo nivel de terreno.

Primera etapa (pilotes del Bastión 1 y del Bastión 2):

Para el colado, se dispuso de una tubería Tremie compuesta por varios tramos y un embudo en la parte superior. Esta se fue ensamblando con ayuda de la grúa y de los ayudantes, posteriormente se introdujo en la perforación y una vez en posición, se procedió a verter el concreto.

Dependiendo del acceso a cada pilote en sitio se pudo colar directamente desde el camión mezclador al embudo (como fue el caso de los ocho pilotes del Bastión 2), o con el uso de una bomba telescópica, la cual lleva

el concreto desde el camión mezclador al embudo de colado que es sostenido por la grúa (tal como sucedió en los seis pilotes del Bastión 1).

Cuando el primer concreto en colocarse cae por la tubería Tremie, este se combina con el material suelto y agua presente (formando concreto sucio), a medida que se continua con el colado, el concreto nuevo saca el concreto sucio hacia la superficie. En la construcción de pilotes se coló hasta sacar todo el concreto sucio y agua, y hasta que el concreto llegara al nivel requerido. Al final de este proceso, se procedió a sacar las camisas antes de que el concreto fragüe.



Fotografía 8. Colado de pilote en Bastión 1.



Fotografía 9. Colado de pilote en Bastión 2.

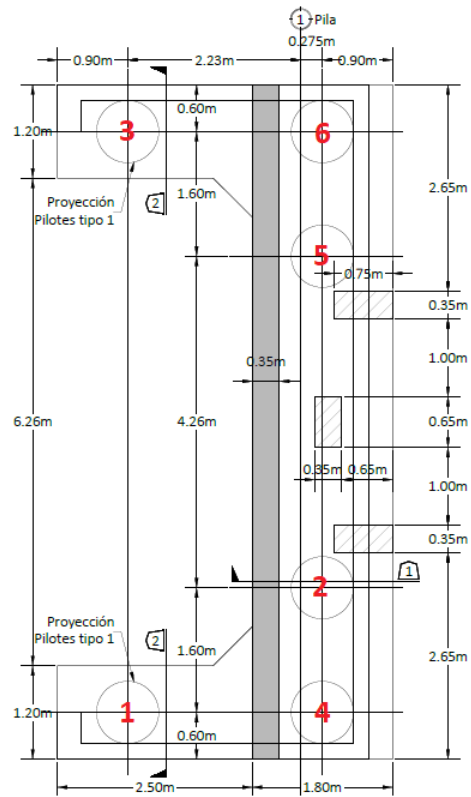


Figura 32. Orden de colado de pilotes en Bastión 1. Fuente: Adaptado de Aya. (2021).

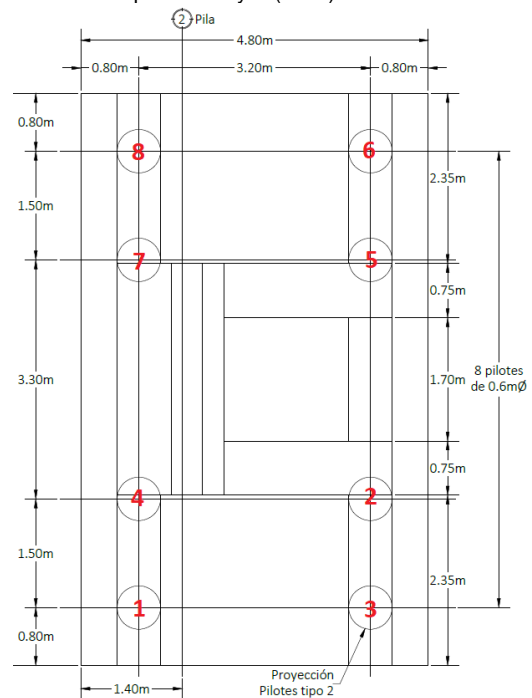


Figura 33. Orden de colado de pilotes en Bastión 2. Fuente: Adaptado de Aya. (2021).

Segunda etapa (solo pilotes del Bastión 1):

Una vez culminado el colado de la primera etapa, se prosiguió con el armado de los pilotes del Bastión 1 sobre el nivel de terreno, esto con el uso de traslapes de varillas longitudinales y espirales. Después se colocó encofrado hasta la altura estipulada en planos (1053,48 m s.n.m) y se llevó a cabo el colado de los seis pilotes con el uso de concreto premezclado y bomba telescópica.



Fotografía 10. Pilotes colados sobre nivel de terreno en Bastión 1.

Descabezado de pilotes:

Finalmente, para descontaminar el pilote se elimina los restos del concreto sucio endurecido. Para esto se excavó con retroexcavadora al nivel de desplante de placa y mediante medios mecánicos se procedió a eliminar los restos de concreto contaminado.

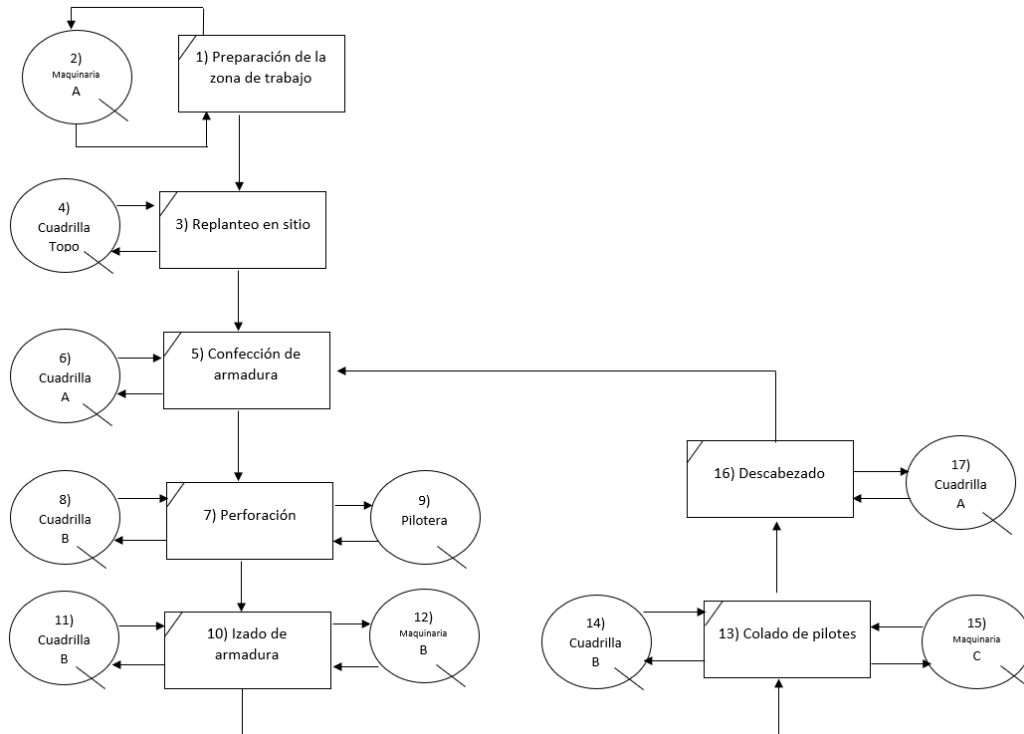


Figura 34. Diagrama de procesos de la construcción de pilotes.

Cuadro 1. Recursos en la construcción de pilotes del proyecto.

Nombre	Recursos
Maquinaria A	Retroexcavadora, compactadora de rodillo liso y martillo hidráulico
Maquinaria B	Grúa camión y retroexcavadora
Maquinaria C	Grúa camión, camión mezclador y bomba telescópica
Cuadrilla Topografía	1 topógrafo y 1 ayudante
Cuadrilla A	9 peones y 1 maestro de obras
Cuadrilla B	3 ayudantes

Proceso Constructivo de Bastiones

Preparación de la zona de trabajo y replanteo en sitio:

En primera instancia, antes de comenzar el proceso de construcción de los bastiones como tal se preparó el terreno alrededor de los pilotes construidos previamente. Esto se hizo con el uso de una retroexcavadora y con el personal usando herramientas mecánicas de trabajo, como palas.

Después, al igual que el replanteo de los pilotes, este proceso se llevó a cabo para ubicar en campo las dimensiones de los bastiones y su relación con respecto a los pilotes construidos según planos. Las tareas en cuestión fueron realizadas por el personal en campo y posteriormente se revisó con la inspección oficial y topografía.



Fotografía 11. Replanteo de Bastión 1.



Fotografía 12. Preparación de zona de trabajo Bastión 1.

Confección de armadura y proceso de armado:

El acero se compró al mismo proveedor del acero empleado en pilotes, el cual presentó el debido certificado que asegura el cumplimiento de las normas requeridas en el proyecto para acero de refuerzo (ASTM A-706), así como el grado 60 y diámetro de la varilla.

Se dispuso de un espacio en obra destinado para almacenar el acero prefigurado (un espacio a cada lado del río), con la colocación de mantos y plástico para proteger el acero del agua.

Para el armado se destinó una cuadrilla de 10 personas, compuesta 9 peones y 1 maestro de obras. Estos se centraron en el armado de un solo bastión y posteriormente, confeccionaron las armaduras del otro bastión.

Se colocaron helados de concreto para asegurar el recubrimiento respectivo, su tamaño varió dependiendo del elemento a construir. Estos fueron asegurados con alambre negro y con el mismo encofrado que fueron colocando a medida que avanzaban con el armado.

Una vez armados los bastiones y antes del colado, topografía llegaba al proyecto para realizar mediciones e indicar si la ubicación de la armadura y formaletas era correcta.



Fotografía 13. Armado de Bastión 2.

Colado de bastiones:

Este proceso se hizo con concreto premezclado de Constructora MECO, el cual fue sometido a pruebas de temperatura y revenimiento del concreto fresco, y posteriormente a pruebas de compresión para garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

Para el colado, gracias al acceso existente a cada sección del Bastión 2 se pudo colar directamente desde el camión mezclador, en caso del Bastión 1 se hizo con el uso de una bomba telescópica, la cual lleva el concreto desde el camión mezclador hasta las diferentes partes de dicho bastión. Para ambos bastiones se emplearon vibradores de concreto para el mejor acomodo del concreto fresco entre las barras de refuerzo.



Fotografía 14. Colado de Bastión 1 con bomba telescópica.

Acabado y curado:

La misma cuadrilla encargada del colado realizó la tarea de dar el acabado final al concreto fresco de las superficies superiores expuestas de los bastiones con el uso de reglas de madera y llanetas. Posterior al colado y remoción de encofrado, se curó el concreto y se corrigieron desperfectos con mortero.



Fotografía 15. Acabado final a placa de Bastión 2.

Cuadro 2. Secuencia de construcción Bastión 1.

Bastión	Elemento	Fecha de colado
B1	Viga Cabezal	5-ago
	Dados de concreto	11-ago
	Viga de Fundación	18-ago
	Muro Pantalla+ viga intermedia + ménsulas	27-set

Cuadro 3. Secuencia de construcción Bastión 2.

Bastión	Elemento	Fecha
B2	Placa de Fundación	23-jun
	Cuerpo + Aletones (Inferior)	3-jul
	Cuerpo + Aletones (Superior)	11-ago
	Ménsulas	27-set



Fotografía 16. Construcción de viga Cabezal Bastión 1.



Fotografía 19. Colado de placa de fundación Bastión 2.



Fotografía 17. Construcción de viga inferior de fundación Bastión 1.



Fotografía 20. Construcción de cuerpo y aletones Bastión 2 (Parte inferior).



Fotografía 18. Construcción de muro pantalla, ménsulas y viga intermedia Bastión 1.



Fotografía 21. Construcción de cuerpo y aletones Bastión 2 (Parte Superior).

Relleno de bastiones:

Se colocó relleno detrás de los bastiones de lastre de tajo compactado al 97%, según especificaciones del diseño estructural.

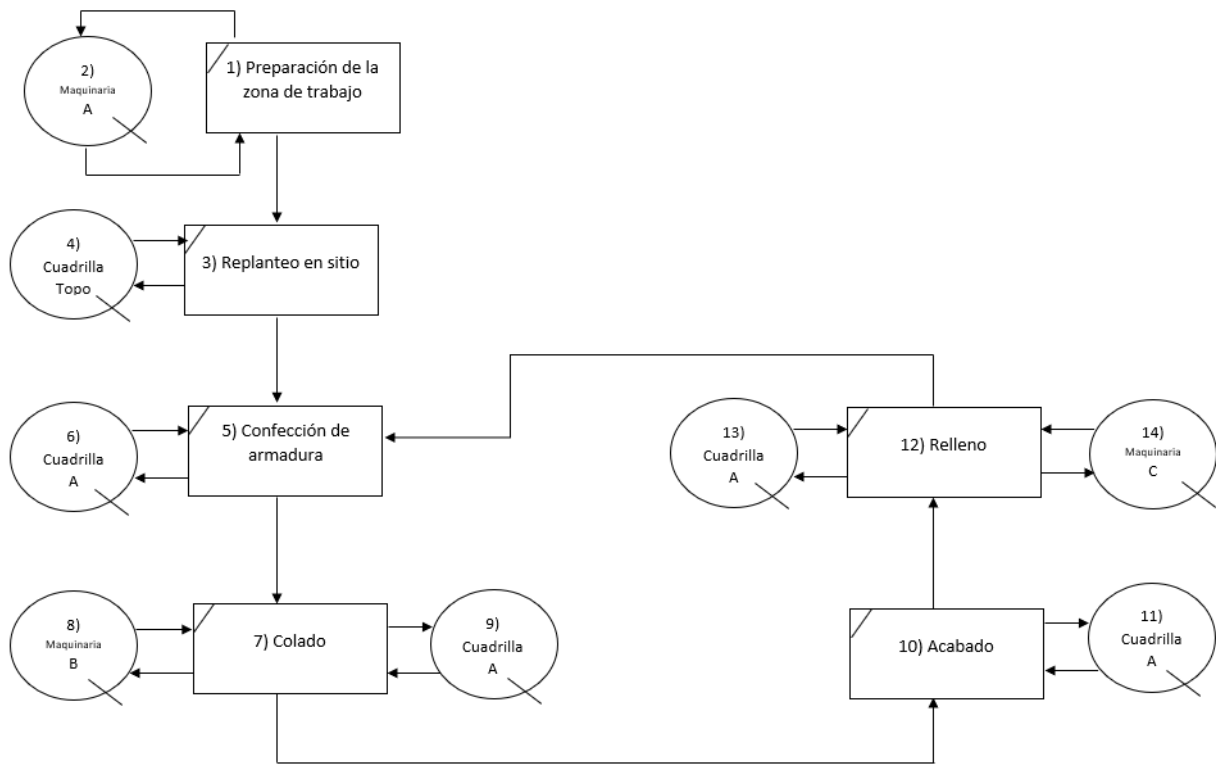


Figura 35. Diagrama de procesos de la construcción de bastiones.

Cuadro 4. Recursos en la construcción de bastiones del proyecto.

Nombre	Recursos
Maquinaria A	Retroexcavadora
Maquinaria B	Camión mezclador y bomba telescópica
Maquinaria C	Compactadora de rodillo liso y apisonador
Cuadrilla Topografía	1 topógrafo y 1 ayudante
Cuadrilla A	9 peones y 1 maestro de obras

Seguidamente, se presentan los modelos 3D de los bastiones realizados en el programa Autodesk Revit. **Estos se modelaron con las dimensiones reales medidas en campo.**

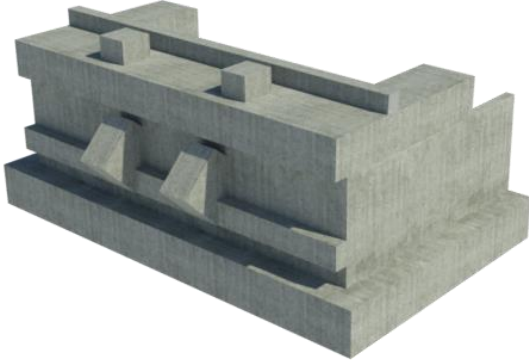


Figura 36. Modelo 3D del Bastión 1. *Elaborado en Autodesk Revit.*



Figura 37. Modelo 3D del Bastión 2. *Elaborado en Autodesk Revit.*

Montaje de Estructura Metálica del Puente

Este proceso se realizó acorde con el plan de montaje de la estructura metálica, documento designado como Esquemático de montaje de cercha confeccionado por MECO y STEEL y se detalla a continuación.

La estructura metálica tipo cercha se fabricó en seis tramos que la empresa STEEL llamó A, B, C,

D, E y F. Estos tramos se montaron con la ayuda de dos grúas (60 y 150 toneladas), y fueron soportados por torres temporales para realizar los últimos ajustes de soldadura antes de cargar la estructura con la tubería, como muestra la siguiente figura proporcionada por MECO y STEEL.

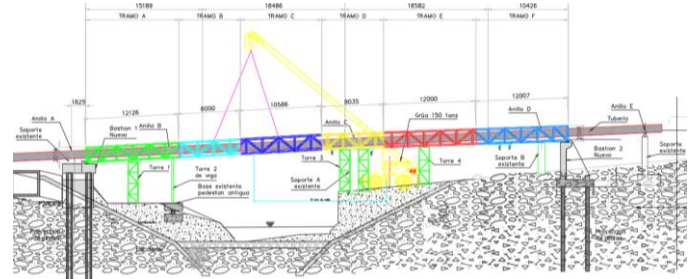


Figura 38. Esquema de montaje de estructura metálica. *Plan de construcción MECO y STEEL.*

La secuencia de montaje seguida se detalla a continuación:

- Los seis tramos fueron transportados al sitio en camiones de plataforma de 12 metros.
- Se soldaron los tramos E y F a nivel de terreno, para después elevar estos tramos unidos con la ayuda de la grúa de 60 toneladas y apoyarlos sobre las placas del Bastión 2 y en la torre temporal 4 como muestra la imagen anterior. Además, se colocó otra torre temporal que no estaba contemplada en el Plan de Montaje, entre la torre temporal 4 y el pedestal de concreto "D", exactamente en el montante 6 de la cercha (contando desde el Bastión 2).
- Posteriormente, se prosiguió con el izaje del tramo D usando la misma grúa. Este se apoyó sobre dos torres temporales, una a cada lado del soporte existente "C".
- Una vez estos tres tramos fueron colocados, se procedió a darles la posición exacta en altura de acuerdo con los planos de taller y posteriormente se soldó el tramo D con el E.
- El siguiente izaje correspondió al tramo A, para esto se instalaron las torres temporales 1 y 2 y se llevó a cabo con la grúa de 60 toneladas. La torre temporal 2 se colocó justo donde estaba localizado el pedestal de concreto "B" antes de que el río lo botara.

- Finalmente, los tramos B y C fueron soldados a nivel de terreno, para después elevarlos unidos con la ayuda de la grúa de 150 toneladas. Primero se colocaron los tramos soldados en el margen del río alineados con la tubería y después se levantó la estructura, para soldarlos con los tramos A y D.
- Mientras se soldaba el tramo compuesto B-C con los tramos A y D, el tramo compuesto fue sostenido con la grúa de 150 toneladas.



Fotografía 22. Montaje de tramos E y F.



Fotografía 23. Montaje de tramo D.



Fotografía 24. Montaje del tramo A.



Fotografía 25. Montaje de los tramos B y C.



Fotografía 26. Instalación de puntales de anclaje W10X45 Bastón 1.



Fotografía 27. Instalación de puntales de anclaje W10X45 Bastón 2.



El diseñador dio a conocer los valores finales a los que se debía llegar de deformación en el tubo y en el puente en los puntos donde se ubicó cada gata. Se fue levantando todas las gatas a la vez hasta que cada una llegara a cierta altura intermedia requerida (antes de la deformación final), y posteriormente se ajustaban las silletas al tubo. Este proceso se nombra de ahora en adelante “ciclo de precarga”.

Procedimiento de Precarga del Puente

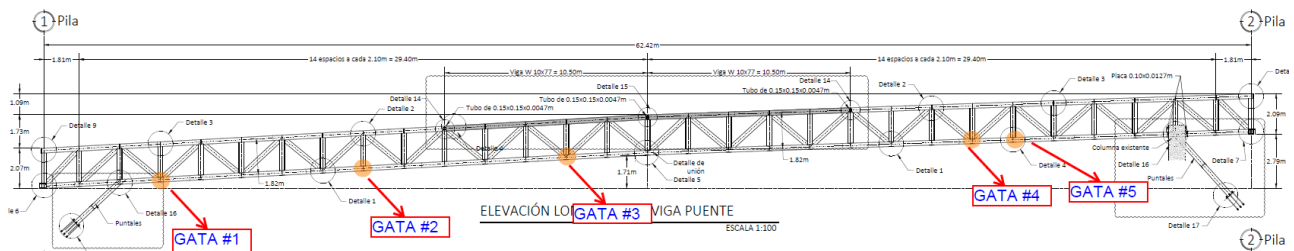


Figura 39. Ubicación de gatos hidráulicos propuesto por empresa diseñadora. *Plan de construcción STEEL.*

Para este procedimiento se instalaron cinco gatos hidráulicos sobre cinco de las vigas transversales del puente, respetando las posiciones indicadas por el diseñador. También se utilizaron placas de acero curvas para proveer mayor área de contacto entre la gata con la tubería, como se ve en la siguiente imagen.

Se calculó cuántos milímetros se debía subir cada gata en cada ciclo de precarga para alcanzar el valor de deformación final. Estos milímetros que se elevaba la gata en cada ciclo fueron medidos por el personal de STEEL con el uso de cinta métrica.



Fotografía 28. Medición de la elevación en gatos hidráulicos.

La gata 3, al ser la más acercada al centro, se elevaba 5 mm por ciclo de precarga y las demás se elevaban un porcentaje de este incremento. Se le indicaba a topografía realizar mediciones de elevación en cada gata de la sección del puente y del tubo, esto a cada ciclo de por medio (cada vez que se elevaba 1 cm en gata 3 medido con cinta métrica).



Fotografía 29. Medición topográfica de la tubería y puente.

Debido a que el tubo no levantaba sus bases apoyadas en las columnas intermedias, el diseñador autorizó cambiar de posición la gata 1 a la viga transversal 18 (contando de Bastión 2 a Bastión 1), y así se consiguió elevar completamente el tubo para que solo fuera sostenido por las gatas instaladas sobre el puente.

Una vez que topografía determinó que se había llegado a la deformación final dada por el diseñador, y cuando se notó visualmente que el tubo se había elevado de las columnas intermedias, se paró el proceso de ciclos de precarga.



Fotografía 30. Placa de apoyo temporal a cortar sobre columna "C" a demoler.

Posteriormente, se confeccionaron perfiles metálicos para colocar debajo de las silletas y se procedió a liberar los gatos hidráulicos.

Resultados inspección estructural

Inspección de Pilotes

Geometría de los pilotes

Pilotes 1-6:

Cuadro 5. Geometría de los pilotes del Bastión 1.

PILOTES DEL BASTIÓN 1				TEC Tecnológico de Costa Rica	
País	Provincia	Cantón	Localización		
Costa Rica	Cartago	Orosi	Puente Negro		
Pilote	Ítem (m)	Dimensiones en Planos	Dimensiones Reales	<p>PLANTA DE BASTIÓN 1</p>	
1	Longitud concreto	14	10,65 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	No visible		
	Diámetro concreto	0,8	---		
2	Longitud concreto	14	10,47 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	0,11		
	Diámetro concreto	0,8	0,88		
3	Longitud concreto	14	10,52 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	0,2		
	Diámetro concreto	0,8	1,06		
4	Longitud concreto	14	10,5 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	0,15		
	Diámetro concreto	0,8	0,94		
5	Longitud concreto	14	10,41 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	0,2		
	Diámetro concreto	0,8	1,05		
6	Longitud concreto	14	11,04 (+3,1)		
	Recubrimiento	0,075	No visible		
	Diámetro concreto	0,8	---		
<p>Observaciones:</p> <p>Recubrimiento no visible: cumple con 7,5 cm debido a los espaciadores utilizados.</p> <p>Recubrimientos medidos a nivel de desplante de viga fundación.</p> <p>A "Longitud concreto" se le suma la altura que se coló fuera del terreno: 3,1 m.</p>					
Inspección:		Oscar Eduardo Lizano Gutiérrez	Día	Mes	Año
				Julio	2021

Pilotes 7-14:

Cuadro 6. Geometría de los pilotes del Bastión 2.

PILOTS DEL BASTIÓN 2				TEC Tecnológico de Costa Rica			
País		Provincia		Cantón		Localización	
Costa Rica		Cartago		Orosi		Puente Negro	
Pilote	Ítem	Dimensiones en Plano(m)	Dimensiones Reales (m)	<p>PLANTA DE BASTION 2</p>			
7	Longitud concreto	11	11,85				
	Recubrimiento	0,075	No visible				
	Diámetro concreto	0,6	---				
8	Longitud concreto	11	11,88				
	Recubrimiento	0,075	0,16				
	Diámetro concreto	0,6	0,72				
9	Longitud concreto	11	11,82				
	Recubrimiento	0,075	0,15				
	Diámetro concreto	0,6	0,7				
10	Longitud concreto	11	11,47				
	Recubrimiento	0,075	0,17				
	Diámetro concreto	0,6	0,74				
11	Longitud concreto	11	11,8				
	Recubrimiento	0,075	0,17				
	Diámetro concreto	0,6	0,73				
12	Longitud concreto	11	11,65				
	Recubrimiento	0,075	0,15				
	Diámetro concreto	0,6	0,69				
13	Longitud concreto	11	11,95				
	Recubrimiento	0,075	0,15				
	Diámetro concreto	0,6	0,68				
14	Longitud concreto	11	11,53				
	Recubrimiento	0,075	0,19				
	Diámetro concreto	0,6	0,78				
Observaciones: Recubrimiento no visible: cumple 7,5 cm debido a los espaciadores utilizados. Recubrimientos medidos a nivel de desplante de placa de fundación.							
Inspección:				Mes	Año		
Oscar Eduardo Lizano Gutiérrez				Junio	2021		

Armado de Pilotes del Bastión 1

Nota importante: todas las figuras de planos presentes en la sección de inspección son de la fuente Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2014) y la actualización (2021).

Cuadro 7. Requerimientos de acero para pilotes del Bastión 1.

PILOTES DEL BASTIÓN 1				TEC Tecnológico de Costa Rica		
País	Costa Rica					
Provincia	Cartago					
Cantón	Orosi					
Localización	Puente Negro					
Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	14,95	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	65		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25		Grupo de Pilotes cumple	Sí/No
Long empalme 7.6.2(F) División 1A AASHTO-2010	60 øvarilla (171,45 cm)	Número de espacios @25 cm	35	Anclaje "U"	Diámetro de barras "U"	No. 4
Grupo de Pilotes cumple	Sí/No	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21 y "U" V-22	20 cm
Observaciones		Aros #5 extra @10 cm	4		17 cm afuera del pilote	Sí/No
		Longitud empalme	60 ø (95,25 cm)		Ductos Previstos ø2,8 cm	Sí/No
		Grupo de Pilotes cumple	Sí/No		Grupo de Pilotes cumple	Sí/No
		Observaciones		Observaciones		

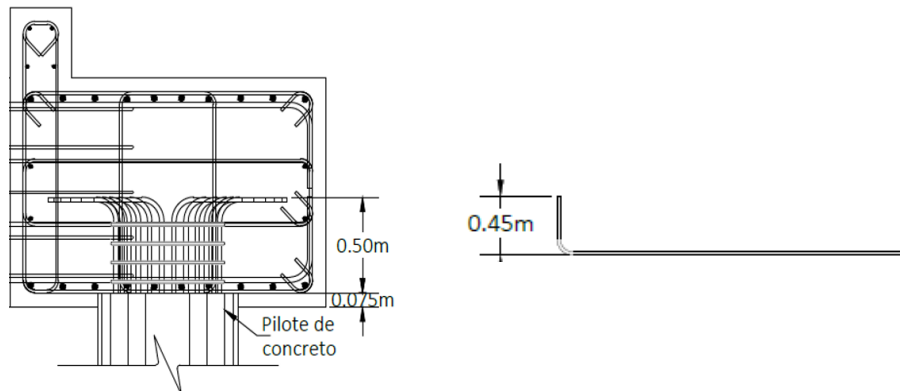


Figura 40. Longitudes de anclaje "Lag" (50 cm) y "Lext" (45 cm) para pilotes del Bastión 1.

Fuente: AyA. (2021).

Pilote 1:

Cuadro 8. Verificación de acero Pilote 1.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	12	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	64		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25	Anclaje "U"	Pilote 1 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	220	Número de espacios @25 cm	35		Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 1 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	107		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 1 cumple	Sí	Grupo de Pilotes cumple	Sí	
		Observaciones		Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Pilote 2:

Cuadro 9. Verificación de acero Pilote 2.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	12	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	66		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25	Anclaje "U"	Pilote 2 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	220	Número de espacios @25 cm	35		Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 2 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21 y "U" V-22	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	105		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 2 cumple	Sí	Grupo de Pilotes cumple	Sí	
		Observaciones		Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Pilote 3:

Cuadro 10. Verificación de acero Pilote 3.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	12	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	66		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25	Anclaje "U"	Pilote 3 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	220	Número de espacios @25 cm	35		Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 3 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	155		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 3 cumple	Sí	Grupo de Pilotes cumple	Sí	
		Observaciones		Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Pilote 4:

Cuadro 11. Verificación de acero Pilote 4.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	12	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	65		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25		Pilote 4 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	224	Número de espacios @25 cm	35	Anclaje "U"	Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 4 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	110		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 4 cumple	Sí		Grupo de Pilotes cumple	Sí
Observaciones				Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Pilote 5:

Cuadro 12. Verificación de acero Pilote 5.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	12	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	65		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25		Pilote 5 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	222	Número de espacios @25 cm	35	Anclaje "U"	Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 5 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21 y "U" V-22	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	105		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 5 cumple	Sí		Grupo de Pilotes cumple	Sí
Observaciones				Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Pilote 6:

Cuadro 13. Verificación de acero Pilote 6.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote		
Longitud de armadura	14,43	Diámetro de barra	No. 5	Anclaje de barras longitudinales en la cabeza del pilote	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 9	Diámetro exterior de espiral (cm)	63		Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	45
Cantidad de barras	26	Número de espacios @10 cm	25		Pilote 6 cumple	Sí
Longitud empalme (cm)	224	Número de espacios @25 cm	35	Anclaje "U"	Diámetro de barras "U"	No. 4
Pilote 6 cumple	Sí	Número de espacios @10 cm	25		Espaciamiento de: "U" V-21	20 cm
Observaciones		4 Aros #5 extra @10 cm	Sí		17 cm afuera del pilote	Sí
		Longitud empalme (cm)	105		Ductos Previstos ø2,8 cm	No
		Pilote 6 cumple	Sí		Grupo de Pilotes cumple	Sí
Observaciones				Observaciones Se respeta los 22 cm y 16 cm de ancho en V-21 y V-22 respectivamente		

Cantidad de anclajes "U" V-21 y "U" V-22:

Cuadro 14. Verificación de acero de anclajes

Pilote	Cantidad "U" V-21	Cantidad "U" V-22
1	16	N.A
2	16	15
3	16	N.A
4	15	N.A
5	15	15
6	14	N.A

Observaciones
N.A: No Aplica

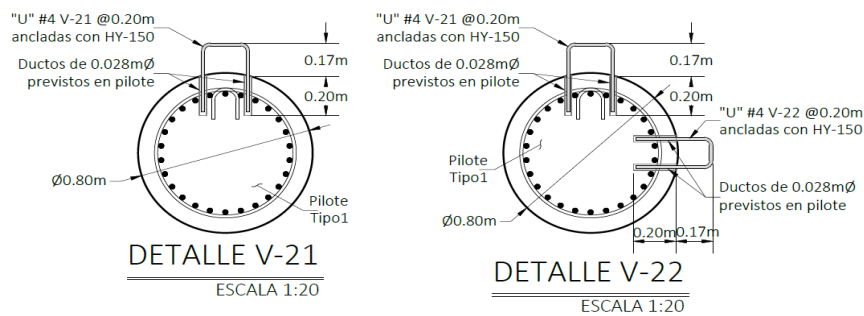
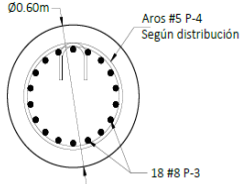


Figura 41. Posición de anclajes "U" en pilotes del Bastión 1.

Fuente: AyA. (2021).

Armado de Pilotes del Bastión 2

Cuadro 15. Requerimientos de acero para pilotes del Bastión 2.

PILOTES DEL BASTIÓN 2				TEC Tecnológico de Costa Rica	
País	Costa Rica		 <p>SECCIÓN DE PILOTE BASTIÓN 2</p>		
Provincia	Cartago				
Cantón	Orosi				
Localización	Puente Negro				
Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura (m)	11,9	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50 cm
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	45	Horizontal: longitud de extensión "lext" (cm)	40 cm
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Grupo de Pilotes cumple	Sí/No
Longitud de empalme: 60 diámetros de barra	152,4 cm	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal	
Grupo de Pilotes cumple	Sí/No	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones	Aros #5 extra @10 cm		4		
	Longitud de empalme: 60 diámetros de barra		95,25 cm		
	Grupo de Pilotes cumple		Sí/No		
Observaciones		Estos pilotes no presentan aros extra #5 @10 cm debido al congestionamiento de acero en viga cabezal			

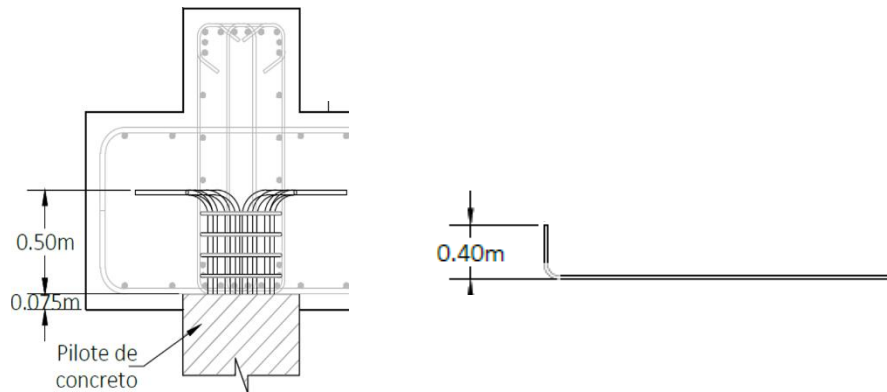


Figura 42. Longitudes de anclaje para pilotes del Bastión 2 "Lag" (50cm) y "Lext" (40cm).

Fuente: AyA. (2021).

Pilote 7:

Cuadro 16. Verificación de acero Pilote 7.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,43	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	41	Horizontal: longitud extensión "lxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 7 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 7 cumple	Sí	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 7 cumple	Sí		
Observaciones					

Pilote 8:

Cuadro 17. Verificación de acero Pilote 8.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,88	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	41	Horizontal: longitud extensión "lxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 8 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 8 cumple	Sí	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 8 cumple	Sí		
Observaciones					

Pilote 9:

Cuadro 18. Verificación de acero Pilote 9.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,9	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	41	Horizontal: longitud extensión "lxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 9 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 9 cumple	Sí	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 9 cumple	Sí		
Observaciones					

Pilote 10:

Cuadro 19. Verificación de acero Pilote 10.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,87	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	41	Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 10 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 153 cm	
Pilote 10 cumple	Sí	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 10 cumple	Sí		
Observaciones					

Pilote 11:

Cuadro 20. Verificación de acero Pilote 11.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,43	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	40	Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 11 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 11 cumple	Observaciones	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal.		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 11 cumple	Sí		
Longitud de armadura menor a la indicada (11,90 m).		Observaciones			

Pilote 12:

Cuadro 21. Verificación de acero Pilote 12.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,43	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	40	Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 12 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 12 cumple	Observaciones	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones No lleva emplame longitudinal.		Aros #5 extra @10 cm	---		
		Longitud empalme	105		
		Pilote 12 cumple	Sí		
Longitud de armadura menor a la indicada (11,90 m).		Observaciones			

Pilote 13:

Cuadro 22. Verificación de acero Pilote 13.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,43	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	39	Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 13 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 150 cm	
Pilote 13 cumple	Observaciones	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones		Aros #5 extra @10 cm	---		
No lleva emplame longitudinal.		Longitud empalme	105		
		Pilote 13 cumple	Sí		
Longitud de armadura menor a la indicada (11,90 m).		Observaciones			

Pilote 14:

Cuadro 23. Verificación de acero Pilote 14.

Longitudinal		Transversal		Anclaje de Cabeza de Pilote	
Longitud de armadura	11,3	Diámetro de barra	No. 5	Vertical: longitud anclaje "lag" (cm)	50
Diámetro de barra	No. 8	Diámetro exterior de espiral (cm)	42	Horizontal: longitud extensión "laxt" (cm)	40
Cantidad de barras	18	Número de espacios @15 cm	13	Pilote 14 cumple	Sí
Longitud empalme	N.A	Número de espacios @25 cm	28	Observaciones Usa empalmes para anclaje horizontal de 155 cm	
Pilote 14 cumple	Observaciones	Número de espacios @15 cm	13		
Observaciones		Aros #5 extra @10 cm	---		
No lleva emplame longitudinal.		Longitud empalme	105		
		Pilote 14 cumple	Sí		
Longitud de armadura menor a la indicada (11,90 m).		Observaciones			

Inspección de Bastiones

Geometría del Bastión 1

Geometría: Vista en Planta

Cuadro 24. Verificación de geometría de Bastión 1 (Planta).

Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Viga Cabezal	Lateral	2,5	2,55
	Lateral	1,8	1,75
	De frente	2,83	2,93
-	Entre ménsulas	1,6	1,61
Viga Superior	Ancho	0,35	0,3
Dados concreto	De frente	0,6	0,6
	Lateral	0,75	0,7
-	Entre dado y viga superior	0,45	0,45
Ménsula	Ancho	0,7	0,7
Muro Pantalla	Lateral	4	4,2 y 5,50
	Al frente	8,66	8,81
	Espesor	0,2	0,2
	Detrás	0,6	No presenta
	Espesor Detrás	0,3	No presenta
Observaciones Se respetó recubrimiento de 5 cm en todo el bastión y chaflán de 2 cm. Las partes del Muro Pantalla que no se presentan, fue debido a modificación avalada por diseñador.			

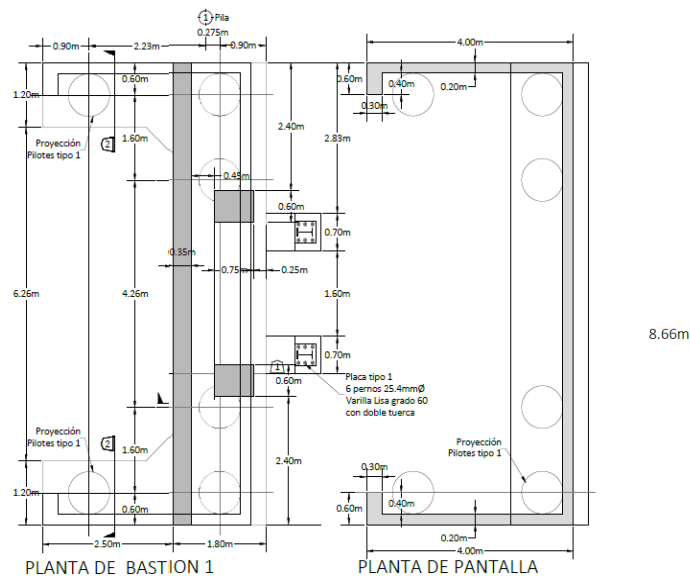


Figura 43. Dimensiones de Bastión 1 (Planta).

Cuadro 25. Verificación de geometría de Bastión 1 (Frontal).

Geometría Frontal Bastión 1			
Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Viga Cabezal	Al frente	8,66	8,81
	Al frente	2,4	2,36
	Entre dados	2,66	2,7
	Peralte	1,2	1,2
Viga Superior	Al frente	8,66	8,81
	Peralte	0,37	0,37
Dados concreto	Al frente	0,6	0,6
	Peralte	0,5	0,4
-	Entre ménsulas y viga intermedia	1,01	1,03 y 0,94
-	Entre viga cabezal y viga intermedia	1,65	1,2
Muro Pantalla	Alto	4,5	3,1
Observaciones			

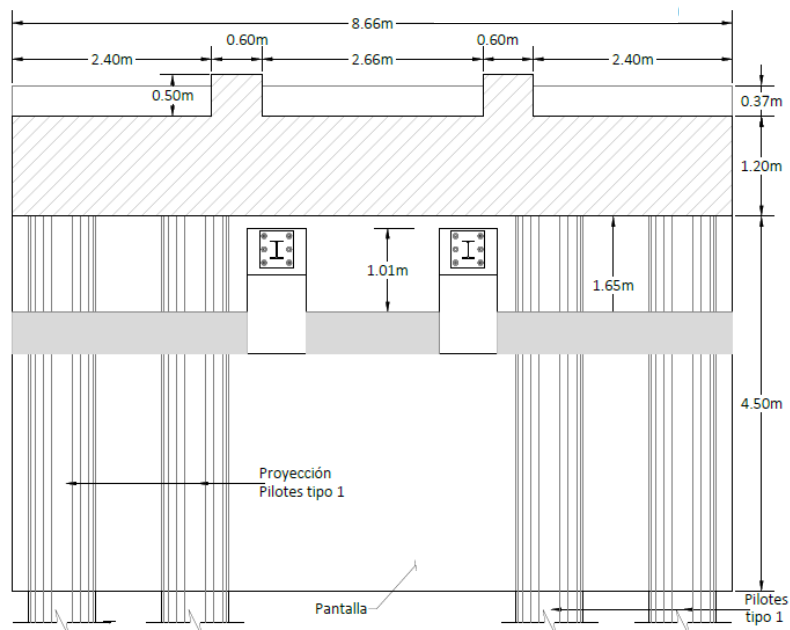


Figura 44. Dimensiones de Bastión 1 (Frontal).

Cuadro 26. Verificación de geometría de Bastión 1 (Lateral).

Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Viga Cabezal	Lateral	2,5	2,55
	Lateral	1,45	1,45
	Peralte	1,2	1,2
	Sección 2-2	1,2	1,2
	Sección 2-2	1,2	1,2
Viga Superior	Ancho	0,35	0,3
	Peralte	0,37	0,37
Observaciones			

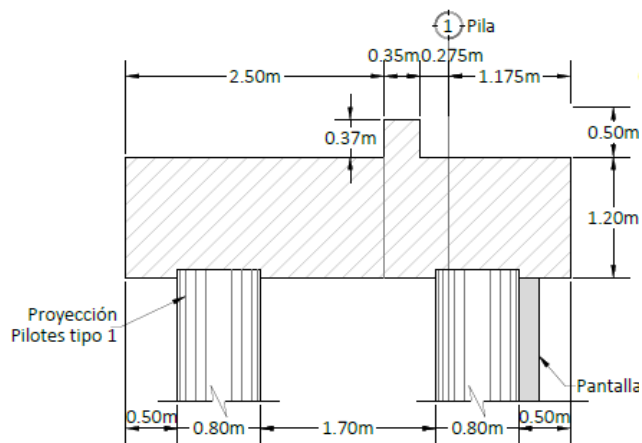


Figura 45. Dimensiones de Bastión 1 (Lateral).

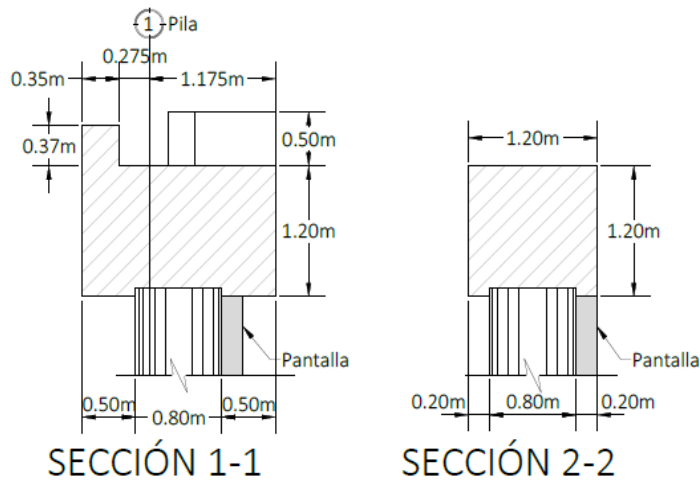


Figura 46. Dimensiones de Bastión 1 (Frontal) 1-1 y 2-2.

Cuadro 27. Verificación de geometría de Bastión 1 (Ménsula).

Elemento del bastión		Planos (m)	Dimensión	
			Ménsula 1	Ménsula 2
Cuerpo Ménsula	Alto	0,79	0,84	0,82
	Alto	0,86	0,86	0,85
	Alto	1,01	1,01	0,95
	Lateral	0,74	0,65	0,61
Viga Intermedia	Peralte	0,5	0,5	0,5
	Lateral	1,4	1,55	1,55
-	Entre viga cabezal y ménsula	0,13	0,13	0,13
Observaciones				

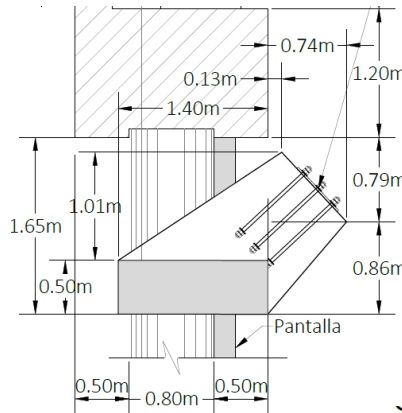


Figura 47. Dimensiones de Bastión 1 (Ménsulas 1 y 2).

Cuadro 28. Verificación de geometría de Bastión 1 (Viga de fundación).

Viga fundación inferior	
Ítem	m
Peralte	0,95
Ancho	0,75
De frente (largo)	9,81
Observaciones: Se respeta recubrimiento de 7,5 cm.	

Geometría de Bastión 2

Geometría: Vista Frontal

Cuadro 29. Verificación de geometría de Bastión 2 (Frontal).

Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Soportes laterales Pedestal	Peralte parte recta	0,5	0,55
	Peralte parte de inclinada	0,4	0,4
	Ancho	0,725	0,75
-	Entre placas acero neopreno	2,66	2,75
Vigas de Amarre	Al frente	2,35	2,39 y 2,34
	Peralte	0,5	0,5
Cuerpo Principal	Ancho	3,2	3,22
Placa Fundación	Peralte	0,95	0,95
Observaciones Se respeta recubrimiento de placa de fundación 7,5 cm y recubrimiento de 5 cm para todo el bastión			

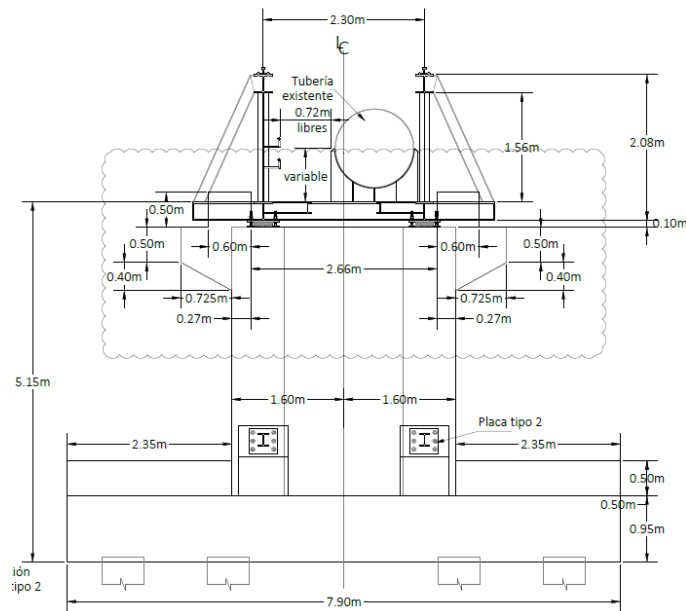


Figura 48. Dimensiones de Bastión 2 (Frontal).

Cuadro 30. Verificación de geometría de Bastión 2 (Lateral).

Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Pedestal	Ancho	1,475	1,5
Dado concreto Pedestal	Peralte	0,5	0,5
Viga Superior Pedestal	Peralte	0,37	0,35
Cuerpo Principal	Alto	3,83	3,7
Vigas de Amarre	Ancho	0,6	0,61
	Peralte	0,5	0,5
-	Entre borde de placa y viga amarre	0,5	0,49
-	Entre vigas de amarre	2,6	2,6
Ménsula	Alto	0,45	0,43
	Alto	0,55	0,53
Aletón	Superficie plana superior	0,15	0,6
Observaciones			

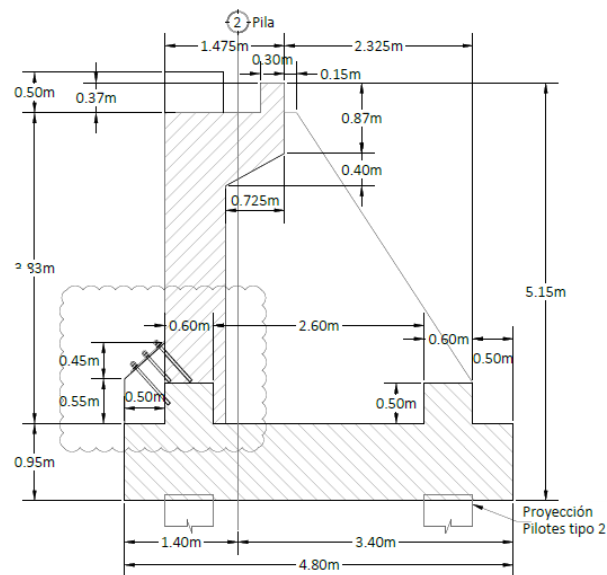


Figura 49. Dimensiones de Bastión 2 (Lateral).

Cuadro 31. Verificación de geometría de Bastión 2 (Planta).

Elemento del bastión		Dimensión	
		Planos (m)	Real (m)
Placa Fundación	Frente	7,9	7,95
	Lateral	4,8	4,82
Viga de Amarre	Parte trasera	2,35	2,37 y 2,39
Aletón	Ancho	0,75	0,75
-	Entre aletones	1,7	1,7
Viga Superior	Ancho	0,3	0,3
Pedestal	Al frete	3,2	3,2
Dados concreto	Al frente	0,6	0,6
	Lateral	0,72	0,73
-	Entre dados	2,66	2,77
-	Entre dados y viga superior	0,459	0,48
-	Entre ménsulas	2,3	2,3
-	Del dado al borde de soporte lateral	0,4	0,35
Soporte lateral	Ancho	147	150
Pedestal	Ancho	0,7	0,7
Ménsula	Ancho	0,7	0,7
Observaciones			

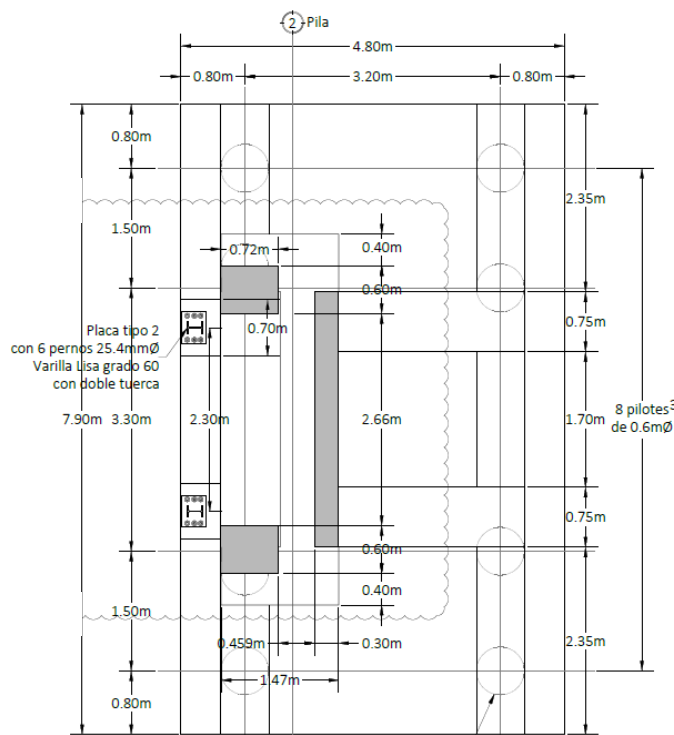


Figura 50. Dimensiones de Bastión 2 (Planta).

Armado del Bastión 1

Refuerzo: Vista Superior

Cuadro 32. Verificación de acero de Bastión 1 (Planta).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Viga Cabezal	Frente (1-1) longitudinal	10#9 V-1 superior e inferior	Sí
	Frente (1-1) transversal	43 Aros #5 V-2+V-3 @0,20m	Sí
	Vértices internos	5#5 V-4 @0,20m	Sí
	Vértices internos	3#5 V-15	Sí
	Lateral (2-2) transversal	12 Aros #5 V-11+V-12 @0,20m	Sí
	Lateral (2-2) longitudinal	9#9 V-14 superior e inferior	Sí
Observaciones			

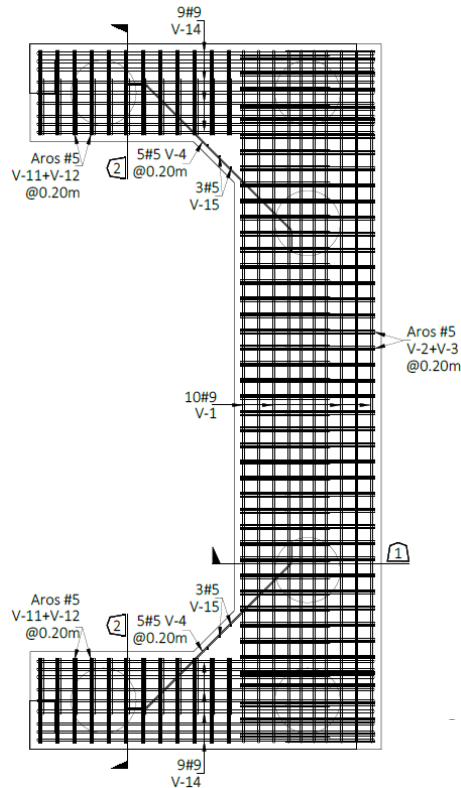


Figura 51. Acero de refuerzo en Bastión 1 (Planta).

Cuadro 33. Verificación de acero de Bastión 1 (Lateral).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Viga Cabezal	Frente (1-1) longitudinal	2#6 V-6	Sí
	Lateral (2-2) longitudinal	2#6 V-13	Sí
Viga Superior	Longitudinal	4#5 V-7	Sí
	Transversal	43 Aros #5 V-5 @0,20m	Sí
Observaciones			

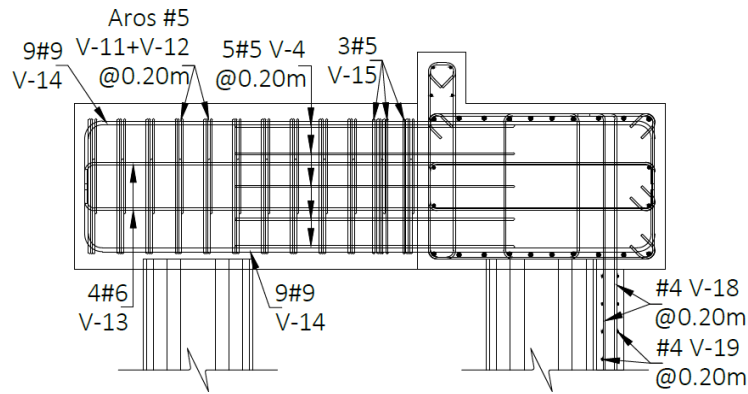
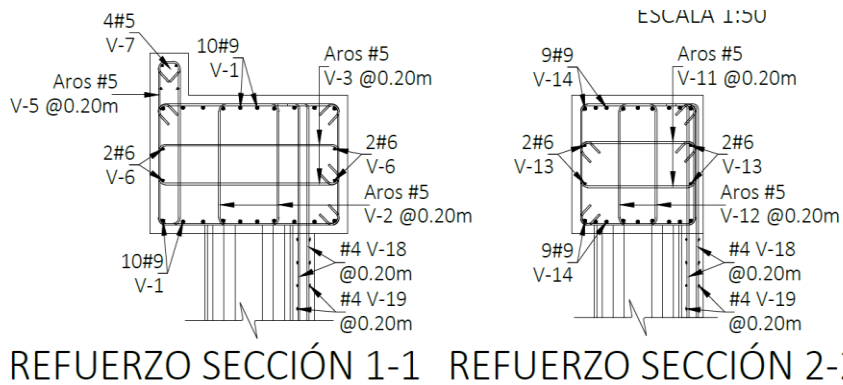


Figura 52. Acero de refuerzo en Bastión 1 (Lateral).



REFUERZO SECCIÓN 1-1 REFUERZO SECCIÓN 2-2

Figura 53. Acero de refuerzo en Bastión 1 (1-1 y 2-2).

Cuadro 34. Verificación de acero de Bastión 1 (Viga Intermedia y Ménsulas 1 y 2).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Viga Intermedia	Longitudinal extremos	6#8 V-31	Sí
	Longitudinal centro	4#5 V-25	Sí
	Transversal	Aros #5 V-26	Sí
		Ganchos #4 V-28@0,20m	Sí
	Ganchos #4 V-29 @0,20m	Sí	
Muro Pantalla	Parte trasera	8#5 V-16 + Aros #4 V-17 @0,20m	No presenta
Ménsula	-	4#5 V-27	Sí
		Aros V-10 @0,20m	
		Malla #3 @0,25m	Sí

Observaciones: El refuerzo de Muro Pantalla que no se presenta se debe a que se requirió acoplar la pantalla a un muro existente. Esto fue avalado por la empresa encargada del diseño.
Se colocaron: 43 Aros #5 V-26 y 28 Ganchos #4 V-28
Los planos indican 4 #6 V-27, pero lo correcto son #5.

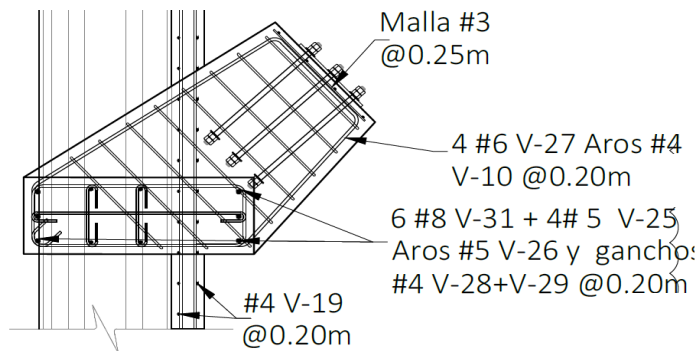


Figura 55. Acero de refuerzo viga y ménsula (Lateral).

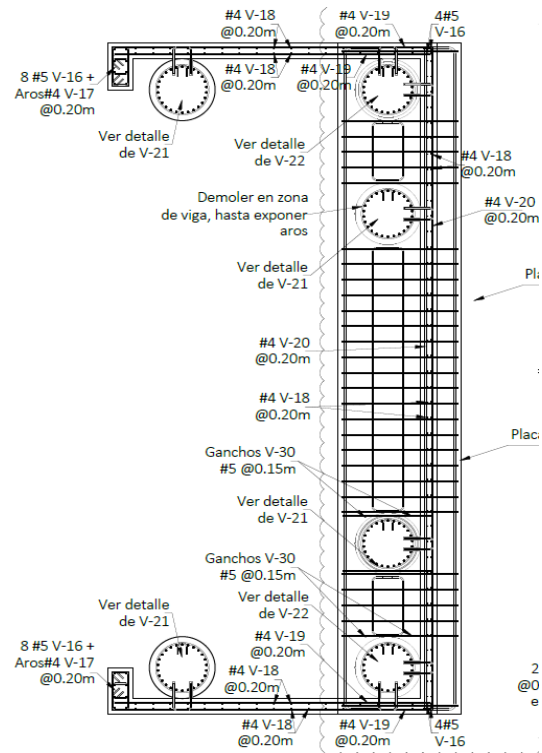


Figura 54. Acero de refuerzo viga y ménsula (Planta).

Refuerzo: Vista Frontal

Cuadro 35. Verificación de acero de Bastión 1 (Frontal).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Muro Pantalla	Vertical	#4 V-18 @0,20m	Sí
	Horizontal lateral	#4 V-19 @0,20m	Sí
	Horizontal frente	#4 V-20 @0,20 m	Sí
	Vertical esquinas	4#5 V-16	Sí
Dado Concreto Pedestal	Longitudinal	4#6 V8	Sí
	Transversal	5 Aros #8 V-9 @0,10m	Sí
Viga Cabezal	-	Doble malla 5#6 @0,20 m	Sí
Observaciones			

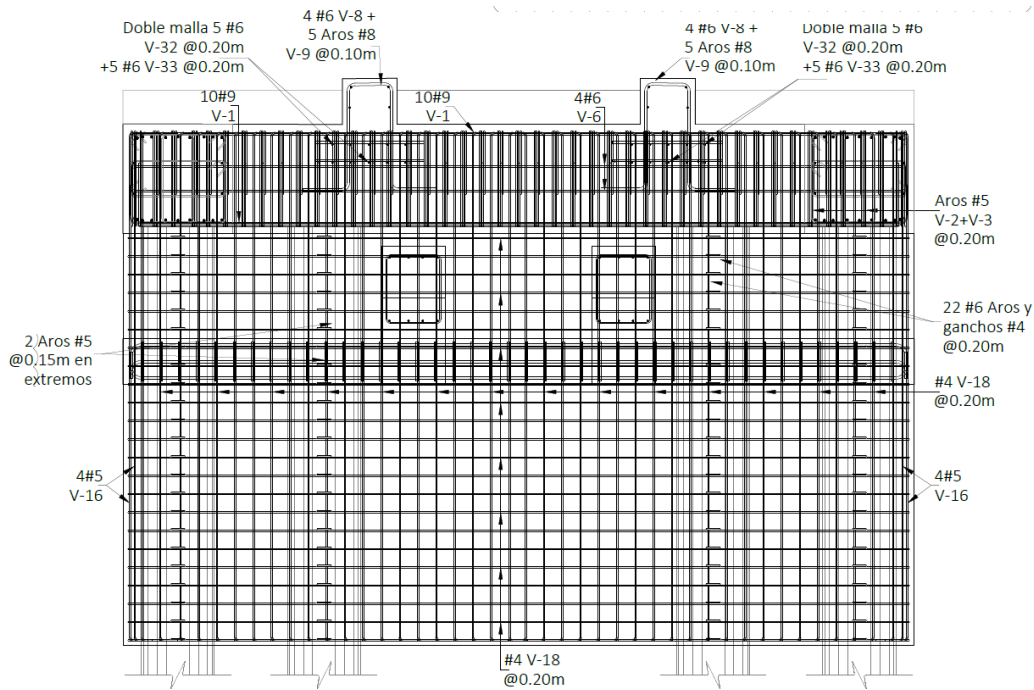


Figura 56. Acero de refuerzo en Bastión 1 (Frontal).

Refuerzo: Viga Fundación Inferior

Cuadro 36. Verificación de acero de Bastión 1 (Viga de fundación).

Viga fundación inferior	
Longitudinal	4 #4 superior
Longitudinal	4 #4 inferior
Transversal	Aros #4 @0,20 m
Observaciones	

Armado del Bastión 2

Refuerzo: Vista Frontal

Cuadro 37. Verificación de acero de Bastión 2. (Frontal).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Dado Concreto Pedestal	Longitudinal	4#6 W-23	Sí
	Transversal	Aros 5#8 W-24 @0,10m	Sí
Soportes laterales Pedestal	Longitudinal	#6 W-28 @0,20m	Sí
	Transversal	6#5 W-29	Sí
Cuerpo Principal	Acero vertical muro frontal	8 #6 W-5 @0,25m	Sí
Vigas de Amarre	Transversal	Aros dobles #5 W-3 @0,25 m	Sí
Observaciones			

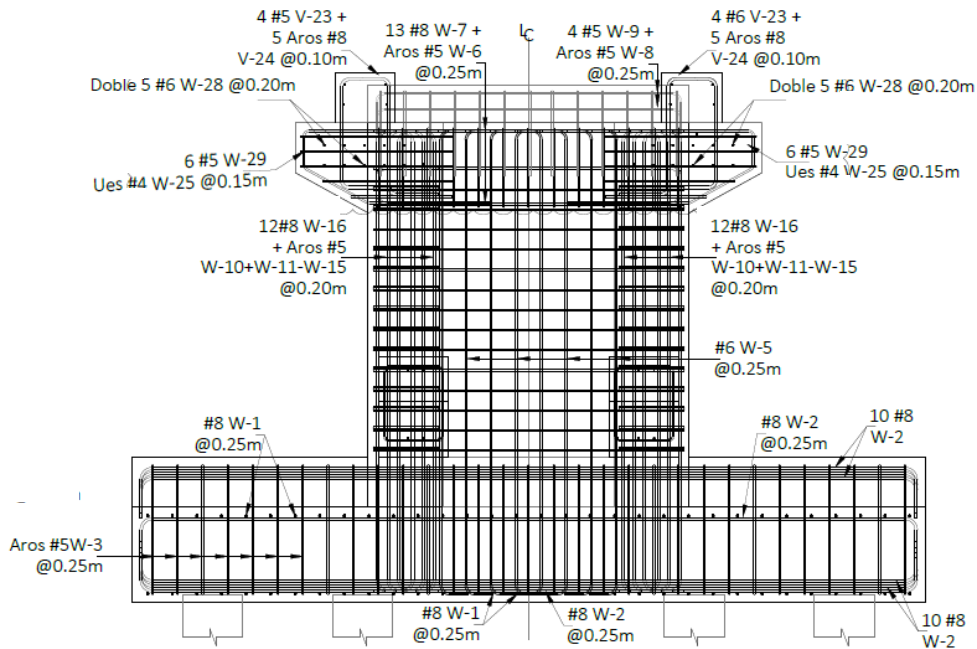


Figura 57. Acero de refuerzo en Bastión 2 (Frontal).

Cuadro 38. Verificación de acero de Bastión 2 (Planta).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Cuerpo Principal	Columnas delanteras	12#8 W-16	Sí
		Aros #5 W-15 @0,20m	Sí
	Columnas posteriores inclinadas	12#8 W-13	Sí
		Aros #5 W-14 @0,20m	Sí
Aletón	-	Doble aro #5 W-10 @0,20 m	Sí
		Ganchos #5 V-18 @0,25m	Sí
Cuerpo Principal + Aletón	Vértice	#5 W-11 @0,20m	Sí
Observaciones Se colocaron 15 aros W-10, W-11 y W-15, y no 18 por el cambio de altura en Bastión 2.			

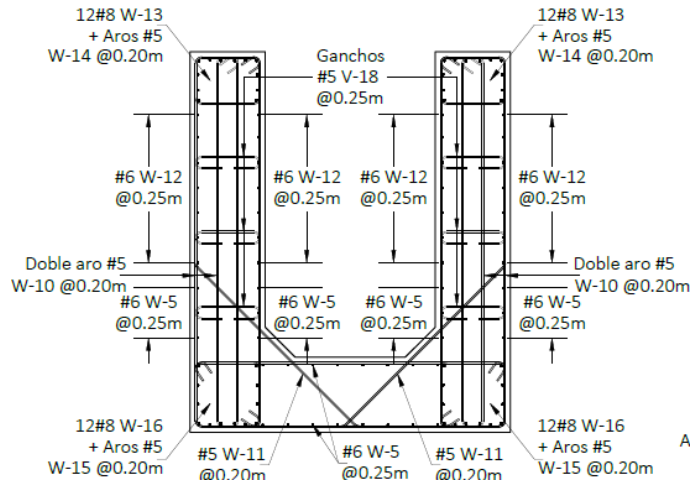


Figura 58. Acero de refuerzo en Bastión 2 (Planta).

Cuadro 39. Verificación de acero de Bastión 2 (Lateral).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Viga Superior Pedestal	Longitudinal	4#5 W-9	Sí
	Transversal	13 Aros #5 W-8 @0,25m	Sí
Pedestal	Longitudinal	13#8 W-7	Sí
	Transversal	13 Aros #5 W-6 @0,25m	Sí
	Transversal	Ganchos #5 W-17 @0,25m	Sí
Cuerpo Principal	Acero horizontal muro frontal	#5 W-4 @0,20m	Si
Vigas de Amarre	Longitudinal superior	10#8 W-2	Sí
	Longitudinal medio	8#8 W-2	Sí
	Longitudinal inferior	10#8 W2	Sí
Placa de Fundación	Malla	#8 W-2 @0,25m	Sí
	Malla	#8 W-1 @0,25m	Sí
Aletón	Acero vertical en incremento de altura	#6 W-12 @0,25m	Sí
	Acero vertical	#6 W-5 @0,25m	Sí

Observaciones
 El plano indica 13#8 W-7, pero son 14 y se colocaron 14.
 Se colocaron 12 ganchos #5 W-17
 No se alternaron los dobleces a 135 de los aros #5 W-8 en viga superior del pedestal.

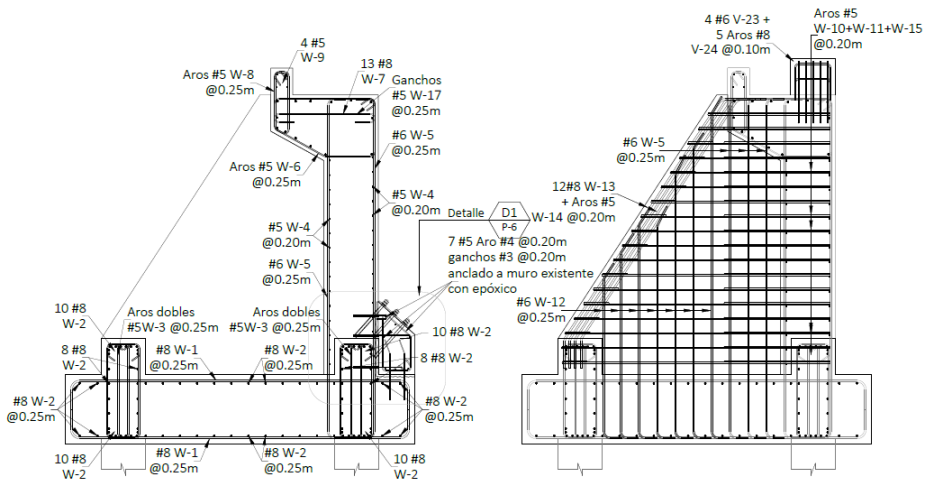


Figura 59. Acero de refuerzo en Bastión 2 (Lateral).

Refuerzo: Ménsula

Cuadro 40. Verificación de acero de Bastión 2 (Ménsulas 1 y 2).

Elemento del bastión		Revisión Acero	
		Planos	¿Real cumple?
Ménsula	Longitudinal	7#5 W-19	Sí
	Tranversal	Aros #4 W-20 @0,20m	Sí
	-	Ganchos #3 W-21 @0,20m anclados a muro de cuerpo principal	Sí
	-	Ganchos #3 W-22 @0,20m anclado a placa de fundación	Sí
Observaciones Sí se colocaron 7#5 W-19 pero en diferente configuración. Esto permitió colocar 4 ganchos #3 W-21 por cada aro #4 W-20, en lugar de 3 ganchos.			

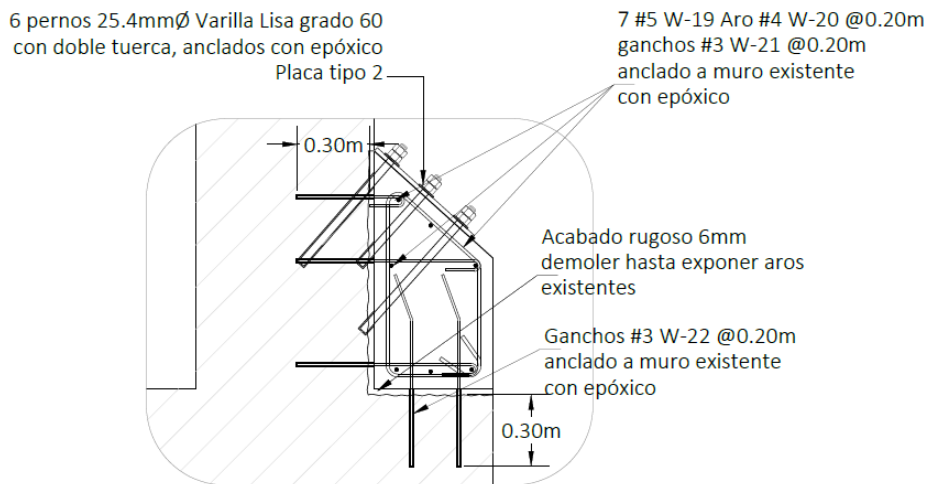


Figura 60. Acero de refuerzo en Bastión 2 (Ménsulas 1 y 2).

Detallado de refuerzo

Bastión 1:

Cuadro 41. Longitudes de desarrollo del acero en Bastión 1.

Elemento	Longitud de desarrollo	Valor real (cm)	Valor a respetar (cm)	Fórmula de Valor a respetar
Muro	Lar (db #4)	80 - 170	76,2	60 db
Pantalla	Lext (db #4)	12	15,24	12 db
Viga Intermedia	Lar (db #5)	260	95,25	60 db
	Lar (db #8)	260	152	60 db
	Lext (db #5)	25	19,05	12 db
	Lext (db #8)	35	30,48	12 db

Calidad de los Materiales

Materiales de pilotes:

Cuadro 42. Verificación de calidad de materiales de pilotes 1-14.

Materiales de Pilotes en Bastiones 1 y 2				TEC <small>Tecnológico de Costa Rica</small>
	Item	Cumple	No cumple	Comprobación
Concreto	f'c: 350 kg/cm ² ASTM C39	X		Informe de ensayo ITP
	Frecuencia muestreo: cada 75 m3	X		Verificación en campo
	Item	Cumple	No cumple	Comprobación
Acero de refuerzo	Grado 60 ASTM A706	X		Certificado Abonos Agro
	Diámetro de varillas	X		Verificación en campo

Materiales de bastiones:

Cuadro 43. Verificación de calidad de materiales de bastiones 1 y 2.

Materiales de Bastiones 1 y 2				TEC <small>Tecnológico de Costa Rica</small>
	Item	Cumple	No cumple	Comprobación
Concreto	f'c: 280 kg/cm ² ASTM C39	X		Informe de ensayo ITP
	Frecuencia muestreo: cada 75 m3	X		Verificación en campo
	Item	Cumple	No cumple	Comprobación
Acero de refuerzo	Grado 60 ASTM A706	X		Certificado Abonos Agro
	Diámetro de varillas	X		Verificación en campo
	Item	Cumple	No cumple	Comprobación
Relleno detrás de bastiones	Material de relleno: lastre de tajo	X		Materiales Ochomogo
	Porcentaje de compactación: 97%	X		Ensayo de campo ITP

Coladas de concreto

Pilotes:

Cuadro 44. Datos del concreto en coladas de pilotes 1-14.

Bastión	Pilote	Temperatura del concreto °C ASTM C1064	Revenimiento cm ASTM C143	f'c promedio kg/cm ² ASTM C39	Fecha
B2	P13	26,9	23	467	3-jun
	P12	27,9	24	385	3-jun
	P14	28,2	22	495	4-jun
	P11	29,2	23	449	5-jun
	P10	26,1	22	481	7-jun
	P8	29,5	24	(440 14 días)	8-jun
	P9				
P7	28,5	26	(405 14 días)	9-jun	
B1	P6	27,1	24	(325 14 días)	11-jun
	P4	28	25	(356 7 días)	16-jun
	P1	30,6	23,5	(390 7 días)	17-jun
	P5	28,4	25	(383 7 días)	18-jun
	P3	29,7	24,5	(433 7 días)	19-jun
	P2	25	24	(381 7 días)	22-jun
	Sobre nivel de terreno: P4, P5 y P6	29,7	22	En espera	13-jul
	Sobre nivel de terreno: P1, P2 y P3	26	24	En espera	27-jul

Bastiones:

Cuadro 45. Datos del concreto en coladas de bastiones 1 y 2.

Bastión	Elemento	Temperatura del concreto °C ASTM C1064	Revenimiento cm ASTM C143	f'c promedio kg/cm ² ASTM C39	Proyección f'c kg/cm ²	Fecha
B1	Viga Cabezal	-	20	288	N.A	5-ago
	Dados concreto	25,3	19	284	N.A	11-ago
	Viga de Fundación	-	21,5	288	N.A	18-ago
	Muro Pantalla + ménsulas	25,4	11	(259 14 días)	287	27-set
B2	Placa de Fundación	25,4	21	N.A	N.A	23-jun
		26,5	22	(315 7 días)	449	23-jun
		26,1	17	N.A	N.A	23-jun
		27	22	(308 7 días)	439	23-jun
	Cuerpo + Aletones (Inferior)	26,4	10	N.A	N.A	3-jul
	Cuerpo + Aletones (Superior)	25,3	19	284	N.A	11-ago
	Ménsulas	25,4	11	(259 14 días)	287	27-set

Crosshole Sonic Logging (Pilotes)

Cuadro 46. Calificación de Crosshole en los pilotes por MYV Soluciones Geotécnicas.

Pilote	Número de prueba	Edad del concreto del pilote (días)	Clasificación de la condición del concreto
1	1	13	P/F
2	1	8	Q
3	1	11	P/F
4	1	14	Q
5	1	12	Q
6	1	19	Q
7	1	6	G
8	1	7	G
9	1	7	Q
10	1	6	G
11	1	4	Q
12	1	7	G
13	1	6	G
14	1	5	Q
1	2	29	Q
3	2	27	Q

Cuadro 47. Longitudes de prueba Crosshole.

Pilote	Longitud de prueba (m)	Longitud pilote
1	9,6	14
2	9,4	
3	8,7	
4	9,7	
5	9,3	
6	6,2	
7	11,1	11
8	10,8	
9	11,1	
10	6,7	
11	10,5	
12	10,7	
13	10,8	
14	10,6	
1	9,4	14
3	8,6	

Resultados comportamiento de estructura metálica

Se realiza el análisis estructural con el fin de conocer la deflexión de la cercha en los nodos críticos de esta. Con base en lo anterior, es posible conocer la reducción de la contraflecha en el centro de la armadura para determinar la reducción final de la contraflecha.

Se desarrolló el procedimiento para determinar el comportamiento de deflexión que presentaría la cercha ante el peso propio y la carga con la tubería, y de esta manera establecer un valor meta al cual se debía llegar y un estándar con el cual comparar los resultados obtenidos en campo. Además, en este mismo proceso se propuso un proceso de transferencia de carga a la cercha, puesto que al inicio del proyecto no existía el Plan de precarga del puente.

Cargas

Cuadro 48. Cargas consideradas.

Elemento	Magnitud	Unidad
P tubería	263,2	kg/m
P agua	969,35	kg/m
P accesorios	25	kg/m
P propio (Robot)	58 293,53	kg
Carga Temporal *	100	kg/m ²

La siguiente tabla indica la manera en que se aplicaron las cargas al modelo del puente con puntales de anclaje y sin los apoyos intermedios. El desarrollo de estos resultados se demuestra en el Apéndice B: Cálculo de Cargas.

Cuadro 49. Manera en que se aplicaron las cargas consideradas para deflexión final.

Elemento	Magnitud	Unidad	Lugar
P tubería + H2O	6 292,15	kg	2 silletas Tipo 1
P tubería + H2O	12 763,02	kg	2 silletas Tipo 2
P tubería + H2O	12 941,74	kg	2 silletas Tipo 3 1 Silleta Tipo 4
P accesorios	25	kg/m	Distribuida en cordón superior
P propio	58293,53	kg	Toda la estructura
Carga Temporal *	100	kg/m ²	Jordomex

(*) Solo se aplicó para el análisis en fase de operación.

Fase de análisis: Montaje y demolición

Deflexiones Finales Autodesk Robot

En este proceso se aplicaron las cargas de la manera mostrada en la Tabla 2, la cual presenta las cargas en las siete silletas una vez que se han demolido los apoyos intermedios B, C y D.

La deflexión final para el puente sin apoyos intermedios es de **10,60 cm en el centro de la cercha** y de 4,88 cm en el nodo opuesto en la misma dirección (obtenidos de Autodesk Robot). Este fenómeno (efecto de torsión), como se muestra en la Figura 61, es provocado por la posición excéntrica de la tubería con respecto al centro de la sección transversal del puente.

Cuadro 50. Deflexiones en el centro de la cercha en Autodesk Robot.

Escenario	Deflexión (cm)	
	Nodo Crítico	Nodo Contrapuesto
Con Puntales W10X45	10,6	4,88
Sin Puntales W10X45	22,14	10,57

Contraflecha final: $31,10 - 10,60 = 20,50$ cm

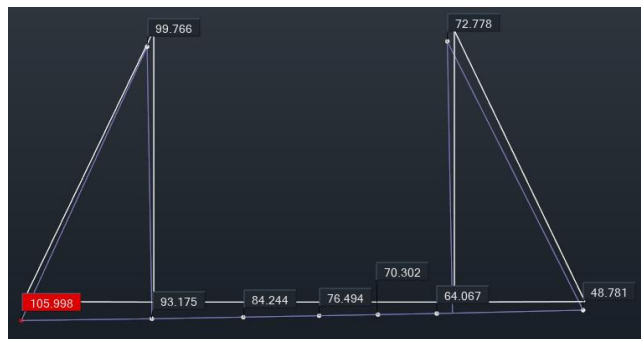


Figura 61. Deflexión final y "Efecto Torsión". Elaborado con Autodesk Robot.

$$\text{Efecto Torsión} = 10,6 \text{ cm} - 4,9 \text{ cm} = 5,7 \text{ cm}$$

Deflexiones Método de Trabajo Virtual

Con el fin de verificar el modelo mediante cálculos, se desarrolló el método energético de Trabajo Virtual en su variante para armaduras. En este caso en específico, se resolvió la cercha **sin los puntales de anclaje W10X45**, ya que el método en cuestión asume una configuración convencional de armadura, como se muestra a continuación:



Figura 62. Modelo de cercha sin puntales de anclaje. Elaborado con Autodesk Robot.

Para la aplicación del método energético de Trabajo Virtual se hizo la simplificación del modelo tridimensional del puente a una sola cercha 2D, a la cual se le tributaron las cargas como se muestra en el Apéndice B Cálculo de deflexión por método Trabajo Virtual.

Dicha cercha 2D se resolvió por el método mencionado y también en Autodesk Robot para su comparación, resultando en las deflexiones a continuación.

Cuadro 51. Comprobación de deflexión por Trabajo Virtual (Puente sin puntales W10X45).

Método	Deflexión en el centro (cm)
Trabajo Virtual	19,42
Modelo Robot 2D	19,76
Modelo Robot 3D	22,14

Deflexiones reales en campo

Los valores de deflexión reales fueron medidos en campo por la cuadrilla de topografía, la cual estuvo presente durante todo el proceso de precarga del puente. En este proceso, la tubería dejó de apoyarse en las columnas intermedias y se cargó el puente con la tubería, lo que generó deformaciones en la cercha y se presenta continuación.

Cuadro 52. Resumen de deflexión medidos en campo.

Escenario	Valores reales (Topografía)	
	Deflexión en el centro (cm)	Nota
Peso Propio (Puente)	5,5	Promedio 4,5 y 6,5 cm
Puente + Peso Tubería	11,36	5,5+5,86
Efecto Torsión	10,04	El valor anterior fue de 5,31 cm.

Nota: El valor de deflexión debido al peso propio de la estructura metálica se presenta en promedio debido al efecto de dilatación y contracción térmica que se presentó, por lo que se obtuvieron diferentes valores para este.

A continuación, se presentan los resultados remitidos por topografía de las deformaciones del puente y la tubería al final de la precarga (transferencia de carga al puente).

Color rojo: el puente bajó.
Color verde: la tubería subió.

Cuadro 53. Deflexiones de Topografía en puente y tubería durante la fase de carga al puente (precarga).

NIVELACIÓN FINAL PT OROSI-27/10/2021		
	NIVEL PUENTE	NIVEL TUBERIA
GATA 1		
ELEVACIÓN INICIAL	1055,2407	1056,7258
ELEVACIÓN FIANAL	1055,2350	1056,7332
DIFERENCIA mm	5,70	7,40
GATA 2		
ELEVACIÓN INICIAL	1055,7851	1057,1716
ELEVACIÓN FINAL	1055,7511	1057,1920
DIFERENCIA mm	34,00	20,40
GATA 3		
ELEVACIÓN INICIAL	1056,3462	1057,6472
ELEVACION FINAL	1056,2876	1057,6624
DIFERENCIA mm	58,60	15,20
GATA 4		
ELEVACION INICIAL	1057,1987	1058,6253
ELEVACION FIANAL	1057,1616	1058,6426
DIFERENCIA mm	37,10	17,30
GATA 5		

ELEVACIÓN INICIAL	1057,2772	1058,7203
ELEVACIÓN FIANAL	1057,2460	1058,7361
DIFERENCIA mm	31,20	15,80
GATA 6(se coloco el mismo dia)		
ELEVACIÓN INICIAL	1056,6092	1057,9564
ELEVACIÓN FIANAL	1056,5939	1057,9613
DIFERENCIA mm	15,30	4,90
PTC C BASTIÓN EXISTENTE		
ELEVACIÓN INICIAL		1058,0128
ELEVACIÓN FIANAL		1058,0206
DIFERENCIA mm		7,80
TORSIÓN FINAL EN EXTREMOS		
ELEVACIÓN AGUAS ARRIBA		1056,3366
ELEVACIÓN AGUAS ABAJO		1056,437
DIFERENCIA mm		100,40
TORSIÓN FINAL EN MARCO		
ELEVACIÓN AGUAS ARRIBA		1058,1664
ELEVACIÓN AGUAS ABAJO		1058,2306
DIFERENCIA mm		64,20

Nota: Tabla elaborada por Topografía.

Fase de análisis: Operación

En este apartado se muestran los resultados de deflexiones de la estructura metálica en la fase de operación, por lo cual se tomaron en cuenta las combinaciones de carga del documento AASHTO LRFD Especificaciones de Diseño de Puentes 2010.

Se hizo uso de la Tabla 3.4.1-1 Combinaciones de Carga y Factores de Carga de dicho documento, así como de la Tabla 3.4.1-2 Factores de Carga para Carga Permanente, y p.

AASHTO (2010) indica:

- RESISTENCIA I: Combinación básica de cargas que representa el uso vehicular normal del puente, sin viento.
- RESISTENCIA IV: Combinación de cargas que representa relaciones muy elevadas entre las solicitaciones

- provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas.
- SERVICIO II: Combinación de cargas cuya intención es controlar la fluencia de las estructuras de acero y el resbalamiento que provoca la sobrecarga vehicular en las conexiones de resbalamiento crítico.
 - Los resultados a continuación fueron obtenidos del modelo estructural 3D en Autodesk Robot, contemplando los puntales anclaje W10x45.

Cuadro 54. Deflexión en casos críticos de operación, acorde con AASHTO LRFD 2010.

Nombre	Combinación	Deflexión en el centro (cm)
Resistencia I	1,25CP+1,75CT	13,31
Resistencia IV	1,5CP	15,9
Servicio II	1CP + 1,3CT	10,65

Análisis de los resultados

Plan de construcción y proceso constructivo

Esta sección se compone de “Estudio de Plan de Construcción” y del “Estudio del Proceso Constructivo”, en donde se interpretan los resultados obtenidos a partir de la observación del proceso constructivo y a partir del estudio de los procesos presentes en los planes de construcción, mediante la evaluación desde la óptica de los objetivos planteados en el proyecto. Se toma en cuenta los requerimientos especificados para este proyecto de construcción, así como disposiciones presentes en manuales y códigos de uso general en Costa Rica aplicables a la construcción de puentes y estructuras en concreto reforzado.

Estudio del Plan de Construcción

A continuación, se señalan defectos y faltas de información, así como virtudes del Diseño de Sitio, Planos Constructivos y Planes de Construcción, con el fin de analizar la factibilidad constructiva y cumplimiento de normas. Además, se identifican opciones de mejora en los casos correspondientes.

Análisis del Diseño de Sitio

Elevación del diseño de sitio:

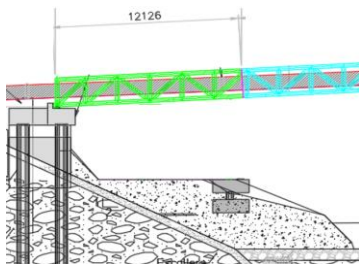


Figura 63. Espacio Disponible Margen Sur (Bastión 1). *Plan de construcción MECO y STEEL*

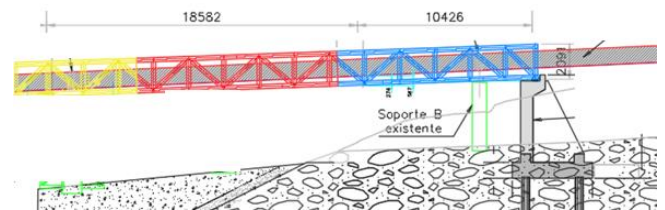


Figura 64. Espacio Disponible Margen Norte (Bastión 2). *Plan de Construcción MECO y STEEL.*

Planta del diseño de sitio:



Figura 65. Planta Margen Norte (Bastión 2). *Google Maps*.



Figura 66. Planta Margen Sur (Bastión 1). *Google Maps*.

Nota: Los cuadros blancos son estaciones de carpintería y doblado de acero

Se observa que el espacio disponible cerca de la ubicación final de los bastiones en el margen norte es prácticamente tres veces mayor en longitud que en el margen sur. Por tal motivo, el margen norte permitió la movilización de maquinaria cerca del Bastión 2 con mayor libertad, además de ofrecer amplio espacio para el armado de acero cerca de dicho bastión.

En comparación, el margen sur ofreció menor área aprovechable cerca del Bastión 1 puesto que el espacio es reducido y presenta vulnerabilidad ante el actuar del río Aguacaliente. Por estos

motivos se implementaron medidas de seguridad y no fue posible armar pilotes ni colocar armaduras a nivel de terreno en las cercanías del Bastión 1 y del río. A pesar de lo anterior, el margen sur ofreció el espacio requerido (lejos del Bastión 1) para instalar los contenedores/oficinas de las empresas, así como la bodega, comedor, silos para desechos (representados en color verde), baños y espacio para armar los pilotes del Bastión 1.

Asimismo, en ambos márgenes se empleó el manejo del agua que provenía de las

perforaciones de pilotes, de las fuertes lluvias y de un alcantarillado cercano al Bastión 1, mediante drenajes con zanjas y pozos. Por todo lo anterior mencionado, se determina que el aprovechamiento del espacio fue el óptimo para el desarrollo del proyecto, y se hace mención a las estaciones de carpintería y de doblado de acero cerca de los bastiones para evitar “pasos extra” y agilizar el armado en el margen sur.

El único apartado que se pudo haber mejorado en cuanto al diseño de sitio fue cerca del Bastión 2 en el margen norte, ya que no se previó el espacio que iba a ocupar la pilotera y su radio de giro, por lo que se hizo necesario un movimiento de tierra posterior.

Análisis del Planos (Actualizaciones y errores)

Los planos constructivos (y sus modificaciones) estuvieron a cargo de la empresa consultora encargada del diseño Camacho y Mora, y forman parte del Plan de Construcción, por lo que las modificaciones que sufrieron los planos incidieron directamente en la ejecución.

En primera instancia, se debe señalar que la deflexión final de la estructura metálica (una vez cargada con la tubería) no era conocida en un principio y la empresa encargada del diseño lo calculó hasta que ya se había comenzado la construcción de bastiones. El desconocimiento de este valor generó uno de los cambios en planos que más impacto tuvo en el proceso constructivo: la implementación de puntales para dar anclaje extra al puente en los bastiones y así reducir la deflexión del puente en el centro del claro.

Los puntales están compuestos por perfiles metálicos W10X45 y arriostrados con tubos de 10X10X0.64 cm. Esta actualización implicó una serie de modificaciones consigo para poder implementar los puntales mencionados, estos comprenden la confección de los perfiles en taller, armado y colado de viga intermedia en el Bastión 1 para apoyar las dos nuevas ménsulas en las cuales se anclan los puntales W10X45, así como en el Bastión 2 también se construyeron dos nuevas ménsulas en las cuales se anclaron los puntales mencionados.

Para anclar se utilizaron pernos, epóxicos y placas de acero, así como soldadura para unir los puntales a las placas de acero y al resto de la

cercha. Se debe recalcar que el proceso de instalación de pernos de anclaje no se presentó en los planos.

La otra actualización que cambió significativamente el curso de la construcción fue la corrección de las cotas de elevación de la parte superior (pedestal) de los Bastiones 1 y 2. Estas se redujeron 1 metro, lo cual incidió en longitud de pilotes del Bastión 1 y en la altura de ambos bastiones (ambos procesos se analizan “Estudio del Proceso Constructivo”).

Posteriormente, se emitió un juego de planos actualizado con las modificaciones mencionadas, más la incorporación de datos de concreto en los pedestales de ambos bastiones, ménsulas laterales a nivel del pedestal del Bastión 2 y la especificación del material de relleno detrás de los bastiones.

Otra construcción extra correspondió a la viga inferior a nivel de fundación del Bastión 1, sin embargo, este detalle no se agregó en el juego de planos actualizados.

Todos estos detalles extra significaron mayor duración para la culminación de los bastiones, ya que estas actualizaciones ocasionaron retrabajos en las tareas relacionadas. La duración de construcción de bastiones planeada era del 20 de junio al 20 de agosto, y la real fue del 20 de junio al 27 de setiembre (última colada).

Análisis del Plan Pilotaje

En la subsección 565.07 del manual CR-2010 se encuentra la indicación de que a la hora de colar con tolva se debe mantener el tubo de descarga sumergido por lo menos 1,5 m bajo la superficie de concreto fluido. El Plan de pilotaje de Geotraesa norma el mismo tema, indicando que la punta de la tubería Tremie siempre debe estar como mínimo 3 metros por debajo del nivel del concreto.

El Plan de pilotaje incluye un registro del material excavado, que es consecuente con lo que pide el CR-2010 565.05. Esta última subsección indica:

- Descripción y elevación aproximada del límite superior e inferior de cada estrato de suelo o material rocoso encontrado y la fecha y hora en que fue encontrado el suelo o material rocoso.
- Agua subterránea encontrada.

- Equipo utilizado, tiempo requerido para perforar un pilote, los cambios de las barrenas, averías y otras dificultades encontradas.
- Observaciones.

Propuesta de mejoramiento en el izaje de armaduras de pilotes:

El plan en cuestión no especifica un procedimiento de izaje de las armaduras de pilotes, el cual es importante para evitar daños en estas, así como malas prácticas y largas duraciones durante este proceso, ya que las armaduras median más de 10 metros de longitud. Debido a esto y a los problemas experimentados durante el izaje en campo, se expone la siguiente propuesta basada en una serie de publicaciones de la página de geotecnia y cimentaciones especiales “Desde el murete”.

En la medida de lo posible se recomienda el uso de grúas auxiliares, o en general una grúa que posea dos cabrestantes (cilindros giratorios), uno principal (que tiene cable con gancho) y otro auxiliar, los cuales se puedan girar independientemente y enrollar su respectivo cable.

Además de la grúa y de los cabrestantes principal y auxiliar, hay elementos que se deberán tener a disposición como cadenas y pulpos instalados en cualquiera de los dos cabrestantes y así levantar la armadura desde más de dos puntos cuando se requiera.

Los pasos estándar por seguir son

- La armadura se encuentra horizontalmente en el suelo.
- Se posiciona la grúa en el lado opuesto a la cabeza de la armadura y se engancha el gancho del cabestrante principal a la cabeza de la armadura.
- Se posiciona el brazo de modo que el plumín de la grúa y la cabeza de la armadura estén en la misma línea vertical. (Así el cabestrante principal tira verticalmente de la cabeza).

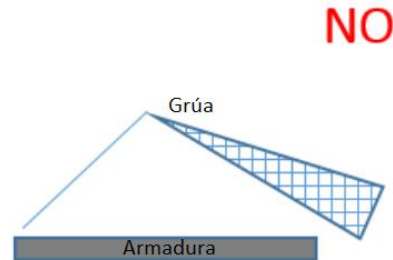
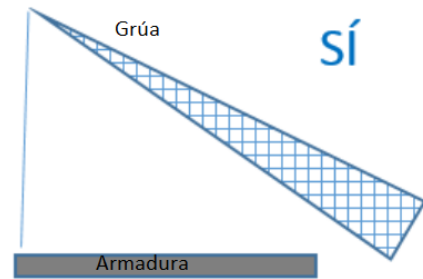


Figura 67. Manera correcta de izar la armadura del pilote.
Fuente: Adaptado de Desde el murete. (2015).

- Con la grúa en la posición mostrada a continuación, se empieza a tirar de los dos cabrestantes al mismo tiempo, de manera que se levante ligeramente la armadura del suelo. El cabestrante principal tira de la cabeza y el auxiliar lo hace de la parte central.

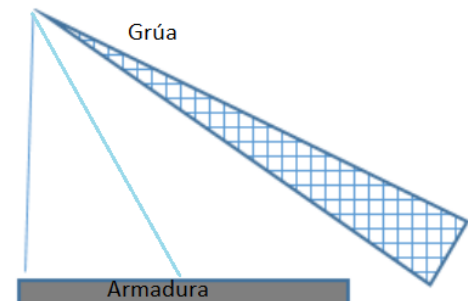


Figura 68. Implementación de dos cables independientes.
Fuente: Adaptado de Desde el murete. (2019).

- Se empieza a recoger el cabestrante principal (en la cabeza) a la vez que se recoge en menor medida el auxiliar, lo que dará verticalidad a la armadura.
- Se continua con dicho movimiento hasta que la armadura esté prácticamente vertical, y llegado a este punto se destensa lentamente el cable del

cabestrante auxiliar para dejar la carga al cable del cabestrante principal.

Importante: Nótese la diferencia entre la configuración mencionada (en donde se tira independientemente de dos cables) y la que se muestra seguidamente, en donde se tira de un solo cable y se pierde el alineamiento del cable respecto a la cabeza de la armadura.

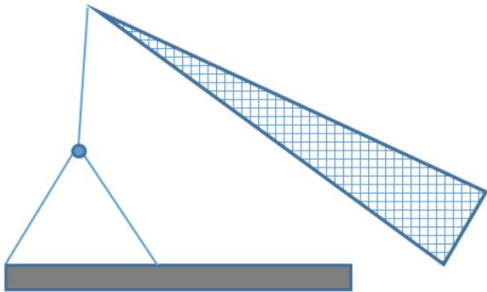


Figura 69. Implementación de dos cables dependientes. Fuente: Desde el murete. (2019).

Propuesta mejoramiento de perforación-colado:

Por último, tampoco se incluyó un orden de perforación y de colado de los pilotes, este flujo de ejecución se determinó en campo conforme se fue avanzando con la construcción de pilotes. Se sabe que este proceso de ejecución está sujeto a cualquier imprevisto al trabajar con diferentes estratos de suelo y roca, sin embargo, es útil proponerlo para establecer un punto de partida que a su vez cumpla con el requerimiento del CR-2010 565.05 (a) que indica que durante 20 horas después de haber colado un pilote, no se deben excavar pilotes adicionales, permitir cargas de llantas excesivas o permitir vibraciones excesivas a una distancia de:

- 5 m
- 3 veces el diámetro del pilote

Se escoge el mayor valor entre ambas distancias, en este proyecto rige 5 m para la construcción de pilotes en ambos bastiones.

Por tal motivo se expone la siguiente secuencia de perforación de pilotes del Bastión 1, en donde al momento que el pilote 13 esté recién colado, la pilotera podrá estar perforando el Pilote 10, respetando los 5 m antes de las 20 horas. En el caso donde se da una distancia menor de 5 m (principalmente 4,6 m), el profesional de ingeniería a cargo de la dirección de obra determinará el

momento en que se proseguirá con la perforación para cumplir las 20 horas.

Cuadro 55. Flujo perforación-colado propuesto.

Perforando Pilote	Último Pilote Colado	Distancia entre pilote perforado y colado
P13	-	-
P10	13	5,77
P14	10	4,8
P9	14	5,77
P12	9	4,6
P7	12	5,77
11	7	4,8
8	11	5,77
-	8	-

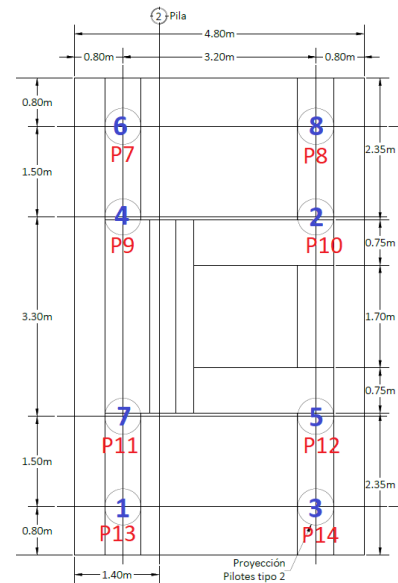


Figura 70. Representación de flujo perforación-colado propuesto.

Análisis del Plan de montaje de estructura metálica

En primera instancia, el Plan de montaje contemplaba armar la estructura metálica en cinco tramos. Tres de estos eran tramos largos de 13,5

m; 14,5 m y 26,2 m; así como dos tramos cortos de 4,2 m colocados de manera intermedia para unir los tres tramos largos. Además, se contemplaba el uso de únicamente dos torres temporales, cada una debajo de uno de los tramos de 4,2 m, y se requería estudiar la necesidad de colocar otra torre temporal en el tramo 5.

Sin embargo, este plan fue modificado debido a la complicación en cuanto al transporte de los tramos largos de la longitud mencionada. Además, no se había tomado en cuenta la vulnerabilidad que presenta la zona cercana al Bastión 1 debido a las crecidas del río, por lo que colocar una única torre en dicha localización era inseguro.

Lo solución consistió en actualizar el Plan de montaje, el cual contempló seis tramos de entre 8 m y 12 m de largo, además se aumentó el número de torres temporales a cinco en total, colocando dos de estas en el margen del Bastión 1. (En la ejecución se colocó una torre temporal extra cerca al Bastión 2, para un total de seis torres temporales).

En cuanto a la maquinaria a emplear, el primer Plan de montaje no especificaba las características que debían tener las grúas para llevar a cabo el izaje de manera segura (como el tipo de grúa a emplear y su capacidad). Debido a esto, se requirió incluir esta información en el Plan de montaje actualizado, que incluyó el uso de dos grúas (de 60 ton y 150 ton), así como su radio de acción y su capacidad reducida dependiendo de este.

Es necesario mencionar que en el Plan actualizado no se estipuló el requerimiento de medición topográfica después de cada montaje de tramo. Por tal motivo no se midieron las elevaciones en distintos puntos del puente con el fin de crear un perfil longitudinal de ambos lados del puente y así, en dado caso, evidenciar la posible existencia de torsión en la armadura.

Este era un dato que se debió conocer previo a la ejecución de la fase de carga del puente, con el fin de corregir cualquier distorsión en la estructura metálica a tiempo y de esta manera evitar que dicha afectación incrementara la deflexión y torsión en fase de carga del puente.

Análisis del Plan de precarga del puente

Este Plan debió haber sido propuesto por la empresa encargada del diseño Camacho y Mora, sin embargo, por cuestiones de tiempo fue propuesto por la empresa STEEL y después fue revisado por Camacho y Mora y por MECO. Debido a esto el plan no contemplaba algunos puntos de vista, los cuales después fueron señalados por los diseñadores como puntos a mejorar.

Primero, no se especificó una manera de conocer la carga en cada una de las gatas con el fin de controlar la fuerza en estas (no solo la deformación), y así evitar que las gatas fueran a fallar. La empresa Camacho y Mora indicó que el tubo presenta mayor rigidez en los extremos ya que está empotrado en el suelo, por lo que no es lo mismo deformar 1 mm en el centro del tubo que en los extremos (habrían unas gatas más esforzadas que otras). Se pudieron haber empleado manómetros para medir la presión, el área de contacto era conocida, y por consiguiente la fuerza sería calculada.

Por otra parte, la posición de las gatas para cargar el puente con la tubería fue propuesta de manera intuitiva, y no había cálculos que lo respaldaran. Además, no se conocía el comportamiento del tubo a la hora de emplear las gatas (deformación hacia arriba). Por estos motivos, la empresa diseñadora modeló el escenario en software con el fin de determinar la ubicación más conveniente de las gatas, tomando en cuenta el comportamiento esperado del tubo.

Debido a estas implementaciones, se modificó la posición propuesta de las gatas presente en este plan, y se utilizaron las dadas por la empresa diseñadora. Estas posiciones definitivas utilizadas se indicaron en el apartado "Procedimiento de Carga del Puente" en la sección de Resultados (ver Figura 30).

Se expone una propuesta de mejoramiento en transferencia de carga al puente. Debido a la gran cantidad de información que esta representa, su desarrollo en cuanto a cálculos y análisis estructural se presenta en la sección de Análisis de resultados de "Comportamiento de la estructura metálica tipo cercha".

Esto con el fin de que el lector no pierda el hilo del análisis de la secuencia constructiva.

Estudio del Proceso Constructivo

A continuación, se señalan aciertos y falencias de los procesos constructivos que se llevaron a cabo en la construcción del puente, con el fin de analizarlos en cuanto al cumplimiento de normas contenidas en manuales, códigos y requerimientos del proyecto (planos y especificaciones).

Análisis del Proceso constructivo de pilotes

Pilotes preexcavados de prueba.

Cuando el contrato así lo requiera, se construyen pilotes preexcavados de prueba. Para esto se debe realizar el trabajo de acuerdo con los requisitos de la Subsección 565.04 y 565.05 del Manual CR-2010.

En el caso específico de este proyecto de construcción, no fue indicada la ejecución de pilotes de prueba.

Preparación de la zona de trabajo y replanteo en sitio:

Como se muestra en la Fotografía 31, la altura entre el nivel de terreno y la tubería en el Bastión 1 no era suficiente para que la pilotera pudiera trasladarse al otro lado de la tubería (aún con el mástil abajo). En vista de esta situación, se tuvo que bajar el nivel de la plataforma de trabajo para que la pilotera pudiera operar y desplazarse sin mayores inconvenientes.

Esta acción incidió en la manera en que se construyeron los pilotes del Bastión 1, la cual se explica más adelante en la sección “Colado de Pilotes” de este análisis.



Fotografía 31. Zona de trabajo en Bastión 1 previo a la intervención.

Topografía se encargó del replanteo en sitio de manera precisa y satisfactoria según criterio profesional de los encargados del proyecto. De esta manera, el replanteo respetó la posición relativa de los pilotes indicada en planos, así como la tolerancia especificada por Geotraesa de 10% en la distancia entre un pilote y otro. Dicha tolerancia se especificó en el plan de construcción de pilotes.

Confección de armadura:

Debido a la gran cantidad de información que representa esta actividad, su desarrollo en cuanto a cumplimiento de normas, tolerancias y planos se encuentra en los resultados y análisis de resultados de la sección Inspección Estructural. Esto con el fin de que el lector no pierda el hilo del análisis de la secuencia constructiva.

Perforación:

El Manual CR-2010 expone dos métodos de perforación en la Subsección 565.05, el método seco y el método húmedo con lodos minerales (bentonita). Los requisitos para efectuar la perforación por el método seco son:

- Se acumula menos de 300 mm de agua en el fondo del pozo cuando no se permite bombeo.
- Las paredes y el fondo de la perforación permanecen estables, sin socavarse, derrumbarse o sufrir hinchamiento

durante un período de 4 horas después de la finalización de la excavación.

- El material suelto y el agua pueden ser extraídos satisfactoriamente antes de la inspección y de colocación del concreto.

En esta ocasión, los profesionales involucrados determinaron que el terreno no presentaba las características geomecánicas que garantizaran que las paredes internas de la excavación no se derrumbarían por acción de peso propio del terreno, vibraciones de la excavación misma y por presencia del agua, por lo que se llevó a cabo la perforación con una alternativa al método húmedo, que consistió en el uso de encamisado metálico para la estabilización.

En cuanto a la ubicación de las perforaciones, el plan de pilotaje indica que una vez que la pilotera se encuentre en posición y con la verticalidad confirmada, se debe hacer una perforación de 0.50 m a 1.0 m de profundidad, con el objetivo de que el topógrafo valide que la excavación dio en el punto exacto (con la tolerancia del 10%).

Si bien es cierto que se cumplió con la tolerancia en el replanteo, a la hora de realizar las perforaciones topografía no estuvo presente en el proyecto. Además, algunos pines del replanteo se movieron debido al paso de maquinaria y movimientos de material, por lo que fue necesario reubicar los pines desplazados partir de un pin que no se hubiera movido.

Por estas razones se evidenció el decremento de la precisión en la ubicación relativa de los pilotes en comparación con el replanteo original de topografía. No obstante, al final del proceso constructivo de los pilotes topografía emitió la resolución de que aún se cumplía con lo requerido.

De acuerdo con topografía, el mayor desplazamiento de pilotes respecto a su posición de replanteo corresponde a 20 cm en el Pilote 11 en dirección al Pilote 12 (Bastión 2). Esto cumple con el 10% de la distancia relativa del Pilote 11 en dirección al Pilote 12 (32 cm).

Esta disminución en la precisión de la posición de los pilotes incrementó la dificultad para llevar a cabo la actividad posterior de armado de los bastiones, específicamente, la placa de fundación del Bastión 2.

Izaje y colocación de armadura:

Para facilitar el izaje de las armaduras de los pilotes, se soldaron dos varillas en forma de gancho "U" en la cabeza de cada armadura. De estos ganchos se agarraron las cadenas de la maquinaria para alzar la armadura y colocarla en la respectiva perforación.

El izaje de los primeros tres pilotes construidos (P12, P13 y P14 en Bastión 2) se ejecutó con la pilotera, y estos fueron los que más problemas presentaron. En el Pilote 13 se quebraron los tubos de la prueba Crosshole por el pandeo excesivo que sufrió la armadura en el centro, en el Pilote 12 se golpeó la tubería con la armadura del pilote y en el Pilote 14 se evitaron estos errores, sin embargo, los profesionales a cargo no estuvieron satisfechos con la duración y fluidez del proceso.

A causa de esto, para los siguientes pilotes se empleó una grúa camión para levantar las armaduras, así como una retroexcavadora para ayudar a ajustar el ángulo de inclinación de la armadura desde la altura media de la armadura. Sin embargo, no fue hasta el izaje del segundo pilote construido en Bastión 1 (P4) que se logró una mejor coordinación entre la grúa y la retroexcavadora.

La tolerancia presente en el CR-2010 565.06 para la colocación final de la armadura de los pilotes es de máximo 150 mm por encima y a no más de 75 mm por debajo de la posición requerida. Para cumplir con esto, la posición de la armadura siempre se midió utilizando como referencia la elevación de un punto conocido previamente marcado por topografía.

El CR-2010 565.06 estipula que si no se cola el concreto inmediatamente después de que se instala la armadura, se puede requerir retirar la armadura antes de colocar el concreto para comprobar la integridad del área excavada y para garantizar que el material suelto se ha retirado del fondo de la perforación. Homólogamente, el Plan de pilotaje de Geotraesa indica que es necesaria la limpieza antes de la colocación de armadura y de dos a tres horas previo al colado.

Estos requerimientos se respetaron durante la construcción de pilotes en este proyecto, y procuraron limpiar la perforación una hora antes del colado, a excepción del Pilote 4 (en Bastión 1) que se limpió 6 horas antes de colar.

Colado de Pilotes:

La subsección 565.07 CR-2010 menciona que la altura máxima de caída libre del concreto es de 8 metros, medida desde el fondo del conducto. La tubería Tremie utilizada en este proyecto siempre se empleó con un número de tramos específico en cada caso para respetar esta solicitud. Además, se cumplió el requerimiento del CR-2010 y del Plan de pilotaje de mantener el tubo de descarga (Tremie) sumergido por lo menos 1,5 m bajo la superficie del concreto fluido.

Los requerimientos anteriormente mencionados se respetaron durante el colado de los catorce pilotes del proyecto de construcción, además, se colaron todos los pilotes hasta extraer todo el concreto sucio de las perforaciones. A pesar del cumplimiento mencionado, no se practicó la consolidación de los 3 metros superiores del concreto del pilote con equipo de vibración, como indica CR-2010 565.07.

En cuanto al análisis de la secuencia constructiva de cada pilote, se indica en planos que los pilotes del 1 al 6 (Bastión 1) deben medir 14 metros de longitud de concreto. Sin embargo, se dieron dos incidentes que cambiaron el curso de su construcción.

El primer incidente se dio con las cotas de elevación en el juego de planos inicial, estos situaban la tubería 1 m más arriba que el valor real, por lo que se ocupaban pilotes de 14 m para llegar al estrato de suelo competente. En el segundo juego de planos se corrigieron dichas cotas, por lo que para llegar al mismo estrato de suelo competente en realidad se necesitaron pilotes de 13 m. Para el momento en que se dio esta corrección ya el Pilote 6 había sido armado y colocado con su longitud de 14 m.

El segundo incidente fue que, debido a las condiciones del terreno encontradas a la hora de la construcción, se tuvo que bajar el nivel de la plataforma de trabajo para que la pilotera pudiera desplazarse por debajo de la tubería.

A causa de estos incidentes, el primer pilote construido (P6) quedó con su armadura muy salida sobre el nivel de terreno, entorpeciendo el proceso de retiro de encamisado metálico después del colado. Para hacer frente a esto, se construyeron los pilotes restantes del Bastión 1 en dos etapas:

- Primera etapa: construir los pilotes por debajo del nivel de terreno.

- Segunda etapa: terminar de armar y colar a partir del nivel de terreno hasta la altura de viga cabezal.



Fotografía 32. Construcción primera etapa de pilotes.



Fotografía 33. Construcción de segunda etapa de pilotes (solo Bastión 1).

El Manual CR-2010 en la subsección 565.07 indica que se deben llenar con agua los tubos de Crosshole después del izado, una hora después del colado del pilote. En cambio, MYV Soluciones Geotécnicas (empresa que ejecutó el ensayo de

Crosshole y P.I.T.) indicó en las recomendaciones de informes que esto es una mala práctica.

MYV (2021a) asegura que los tubos se deben llenar antes de colarse el concreto en el pilote, para evitar deformaciones y evitar que el calor de hidratación del concreto cause desadherencia entre el tubo y el concreto. En la construcción de pilotes, se ejecutó el llenado de los tubos con agua posterior al colado.

Flujo de trabajo perforación-colado de pilotes:

El flujo de trabajo perforación-colado de pilotes, depende mucho del ritmo de perforación que se logre con la pilotera, para esto es necesario proponer el flujo desde el plan de pilotaje y basarse en el estudio de suelos. Sin embargo, en los estudios de suelos se realizan perforaciones al azar y es bien conocido que los estratos del suelo pueden cambiar notablemente en cuestión de unos pocos metros. Por lo que en campo se debe tener en cuenta que existen grandes posibilidades de que sucedan atrasos en el cronograma de perforación basado en estos estudios.

Como se mencionó, el plan de pilotaje no estipuló un orden de perforación-colado, por lo que se determinó en campo y siguió la dinámica en que la pilotera excava un pilote y ese mismo día se colaba. Mientras se cola este pilote, la pilotera se moviliza a la siguiente localización y comienza su excavación para que esta pueda estar lista en horas del día siguiente, y así mantener el flujo de trabajo. Debido a la longitud de los pilotes en cuestión, si fue posible que la pilotera alcanzara un rendimiento de una perforación al día, por lo que en promedio se logró un pilote colado por día.

El CR-2010 565.05 (a) indica que durante 20 horas después de haber colado un pilote, no se deben excavar pilotes adicionales, permitir cargas de llantas excesivas o permitir vibraciones excesivas a una distancia de:

- 5 m
- 3 veces el diámetro del pilote

Se escoge el mayor valor entre ambas distancias, en este proyecto rige 5 m para la construcción de pilotes en ambos bastiones.

A continuación, se presenta un cuadro análisis que indica cuáles pilotes presentaron problemas con el requerimiento anterior. Del cuadro a continuación se puede afirmar que los pilotes que

podieron verse afectados por excavaciones cercanas antes de las 20 horas después de su colado, fueron P8, P9, P10, P12, P13 y P14. De estos últimos, los pilotes P9 y P14 obtuvieron calificación de la prueba Crosshole “Q: Cuestionable”, que MYV clasifica como “aceptables”, sin embargo es una calificación menor a la máxima posible “G: Bueno”.

Por último, se colaron los pilotes del Bastión 1, proceso en el cual se siguió la recomendación de respetar los 5 m de distancia en las primeras 20 horas después del colado.

Cuadro 56. Flujo de perforación-colado seguido en campo.

Bastión	Pilote	Fecha de perforación	Fecha de colado	Tiempo entre colado del pilote y una posterior perforación (h)	Distancia entre el pilote colado y la posterior perforación (m)	Pilotes involucrados	NOTA
B2	P13	1 y 2 jun	3-jun	18,5	3,2	P13-P14	-
	P12	1-jun	3-jun	14,5	1,5	P12-P14	-
	P14	3-jun	4-jun	17	3,44	P14-P11	-
	P11	4 y 5 jun	5-jun	22	4,78	P11-P10	Tiempo mayor a 20 h, no hay problema
	P10	5 y 7 jun	7-jun	14h (P8) y 13h (P9)	1,5m (P8) y 3,2m (P9)	(P10-P8) y (P10-P9)	-
	P8	8-jun	8-jun	17	3,2	P8-P7	-
	P9	7 y 8 jun	8-jun	16,5	1,5	P9-P7	-
	P7	9-jun	9-jun	-	-	-	-
B1	P6	11-jun	11-jun	-	-	-	-
	P4	15 y 16 jun	16-jun	Simultáneamente	6,37	P4-P1	Distancia mayor a 5 m: no hay problema
	P1	16-jun	17-jun	Simultáneamente	7,86	P1-P5	
	P5	17 y 18 jun	18-jun	Simultáneamente	5,86	P5-P3	
	P3	18 y 19 jun	19-jun	-	-	-	-
	P2	21 y 22 jun	22-jun	-	-	-	-

Análisis del Proceso constructivo Bastiones

La construcción de bastiones debía respetar los planos y especificaciones técnicas del proyecto, así como el ACI 318 y la Sección 552 “Concreto Estructural” del CR-2010 al tratarse de una construcción en concreto reforzado.

Inicialmente, la elevación de la tubería reportada en planos era errónea, por lo que las elevaciones de los bastiones arrastraron dicho error en el primer juego de planos. Para hacer frente a esta situación, se decidió mantener el nivel de desplante de los bastiones y reducir su altura en 1,13 metros (según indicó topografía). Este incidente generó retrabajos en la etapa de armado del Bastión 2 y mayores duraciones.

Confección de armadura:

Debido a la gran cantidad de información que representa esta actividad, su desarrollo en cuanto a cumplimiento de normas, tolerancias y planos se

encuentra en los resultados y análisis de resultados de la sección Inspección Estructural. Esto con el fin de que el lector no pierda el hilo del análisis de la secuencia constructiva.

Colado de Bastiones:

Este proceso respetó la indicación del CR-2010 552.11 de no dejar caer concreto sin confinamiento a más de dos metros. (El confinamiento se refiere al uso de un tubo ajustado como en el colado de pilotes).

El orden en que se colaron los diferentes elementos que componen los bastiones se vio influenciado por las actualizaciones en los planos debido a la incorporación de puntales W10X45. Estas modificaciones se hicieron una vez que ya había comenzado la construcción de los bastiones, además se duró un tiempo para recibir los planos actualizados. Por estas razones, se

comenzó construyendo las partes de los bastiones que no sufrirían cambios.

En cuanto al Bastión 1, el colado de sus elementos comenzó por la viga cabezal, después por la viga a nivel de fundación y por último el muro pantalla con la viga intermedia y ménsulas. El colado se ejecutó de esta manera debido a que la viga cabezal fue el único elemento que no sufrió grandes cambios, después se dio a conocer la necesidad de viga inferior mientras aún no se habían recibido los planos actualizados y por último colaron la viga intermedia y ménsulas cuando los planos estuvieron listos.

Esta secuencia ocasionó que los elementos con la geometría más compleja (ménsulas) con su viga intermedia y muro pantalla, quedaran para colar de último, por lo que se tuvo que colar entre la viga cabezal y la viga inferior. Esto generó que a la hora del colado el concreto no pudiera llegar a todos los espacios de las formaletas, por lo que al desencofrar se evidenciaron imperfecciones como huecos y hormigueros.



Fotografía 34. Problemas en colado de Bastión 1 (a).



Fotografía 35. Problemas en colado de Bastión 1 (b).

En cuanto al Bastión 2, sí fue posible efectuar el colado del bastión desde los elementos inferiores hasta los superiores, debido a que el principal cambio se situó en la parte superior. A pesar de esto, fue necesario interrumpir la construcción del bastión a media altura mientras se daba a conocer cuáles serían los cambios en la parte superior. A causa de esto, se produjo una junta de construcción a la altura media del bastión.

El tema de juntas de construcción está presente en las especificaciones técnicas del proyecto y las especificaciones técnicas generales del AyA. Estas indican la instalación de llaves de corte en el concreto fresco de la junta, sin embargo, debido a la cantidad de acero embebido en concreto fresco que quedó expuesto, se empleó una superficie rugosa de manera intencional para poder transferir el corte entre los dos concretos construidos en tiempos diferentes (junta por fricción según indica el ACI 318).

Además, se aplicaron las recomendaciones del manual CR-2010 subsección 552.12 que indica que estas juntas deben ser limpiadas y saturadas antes de colar el concreto nuevo, y que el acero de refuerzo debe pasar a través a las juntas de construcción.

Instalación de anclajes:

En el Bastión 1 los anclajes se instalaron junto con la armadura de las ménsulas, por lo que quedaron empotrados al concreto después de colar estos elementos.

En el Bastión 2 se instalaron los anclajes taladrando el cuerpo del bastión y empleando adhesivo químico para anclajes con cargas estructurales AnchorMax 200.



Fotografía 36. Instalación de anclajes en Bastión 2.

El código ACI 318-19 en el apartado 26.7.2 de requisitos de construcción para anclaje al concreto, estipula que los anclajes adheridos deben ser instalados en el concreto después de 21 días de colado (como mínimo). Este requerimiento se respetó debido a que estos se instalaron el 27 de setiembre en el cuerpo del Bastión 2 (el cual fue colado el 3 de julio).

Análisis del Montaje de estructura metálica

El ensamblado por tramos de la estructura de cercha se ejecutó de manera limpia y sin mayores contratiempos, gracias a que en todo momento se siguieron las indicaciones y recomendaciones estipuladas en el Plan de montaje.

Se hicieron unos cambios respecto a la configuración de torres temporales del Plan de montaje, con el fin de que cada silleta (encargadas de acoplar el puente con la tubería) quedara con una torre temporal debajo, y así aumentar la seguridad de la estructura metálica y el proceso de montaje.

Para esto no solo se colocaron dichas torres en la posición indicada en el plan, sino que también se agregó una torre temporal extra alineada con la viga transversal 6 (contando desde el Bastión 2 en dirección al Bastión 1), ya que en esta viga se ubica una silleta. Además, la torre que en el Plan aparecía en la viga transversal 10, se colocó en la 11 (contando en dirección del Bastión 2 al Bastión 1).

A cada una de las torres se le dio la altura estipulada antes de montar el tramo de cercha

sobre estas, y posterior al montaje se volvió a corroborar. Después del izado y colocación de los tramos se ejecutó la soldadura los perfiles metálicos montados. La calidad de estas se determinó mediante un reporte de ensayo por ultrasonido industrial ejecutado por DC DULSAE S.A., cuyos resultados indicaron qué soldadura sí sería aceptada.

Sin embargo, el Plan de montaje no indicó la participación de topografía durante el ensamblaje de cada tramo, por lo que las mediciones no tuvieron la precisión que se pudo haber logrado con topografía. En relación con lo anterior, semanas después de culminar el montaje, topografía determinó que el puente presentaba una diferencia de altura entre extremos de sección transversal (torsión) de 0,7 cm en el centro antes del proceso de carga con la tubería.

Análisis de la Precarga del puente

El proceso constructivo del puente culminó con esta actividad, la cual se ejecutó de acuerdo con el Plan de precarga del puente y tomando en cuenta los lineamientos emitidos por la empresa Camacho y Mora posterior a la revisión de dicho plan.

Como se mencionó, las deformaciones milimétricas impuestas al puente con cada gata fueron medidas con cinta métrica, por lo que la precisión de estas últimas no representó una confiabilidad comparable con las mediciones topográficas. Topografía emitió el criterio de que habría sido mejor que los trabajadores de STEEL utilizaran pie de rey en vez de cinta métrica.

Al final del proceso de precarga, topografía determinó que el tubo se había elevado 1,8 mm en la pila existente C, sin embargo siguieron deformando con las gatas hasta poder ver visualmente este suceso. Esta acción nació del criterio de los ingenieros involucrados para estar totalmente seguros de que la tubería ya no descansaba sobre los apoyos intermedios. Sin embargo, esto generó mayores deformaciones en el puente y en la tubería, aún cuando topografía había indicado que la tubería ya se había elevado del apoyo C.

En cuanto a la recomendación de emplear manómetros para controlar la carga en cada gata, esta no pudo ser acatada debido a la poca antelación con la que Camacho y Mora recomendó previo al inicio del proceso en cuestión. Por tal

motivo, se evidenció el daño de algunas gatas y su esfuerzo hasta la capacidad máxima.

Lo anterior también se debe a la configuración de las gatas propuesta por Camacho y Mora, ya que en campo se observó que al cambiar la gata 1 a la viga transversal 18, se logró llegar a la deformación requerida fácilmente.

Finalmente, no se debe perder de vista el hecho de que existía una torsión de 0,7 cm previo a la precarga del puente, lo cual incidió directamente en las mediciones obtenidas por topografía.

Análisis de inspección estructural

Geometría de pilotes y bastiones

En esta sección se examinan las dimensiones finales de la subestructura del puente (elementos terminados) y se contraponen con lo indicado en planos.

La geometría de los pilotes de los bastiones 1 y 2 se encuentra resumida en los cuadros 5 y 6 respectivamente, en las que se indica la longitud de estos elementos, así como el diámetro de su sección transversal y recubrimiento. La revisión de geometría de los bastiones se presenta en los cuadros del 24 al 31.

Pilotes

Pilotes del Bastión 1:

La geometría de los pilotes de los bastiones 1 y 2 se encuentra resumida en las figuras 2 y 3 respectivamente, en las que se indica la longitud de estos elementos, así como el diámetro de su sección transversal y recubrimiento.

Se indica en planos que los pilotes del 1 al 6 (Bastión 1) deben medir 14 metros de longitud y 80 cm de diámetro con recubrimiento de 7,5 cm. Sin embargo, se dieron dos incidentes que cambiaron el curso de su construcción y el resultado final. (Estos fueron explicados anteriormente en el OE1: cotas de elevación de la tubería erróneas y problemas con el retiro de encamisado después del colado).

Por tal motivo, se permiten pilotes de 13 m y los resultados de longitud de concreto de los pilotes del Bastión 1 se reportaron de la siguiente manera:

- Primera etapa: utilizando los datos reportados por Geotraesa (“Cota fondo de excavación” y “Elevación del concreto”).
- Segunda etapa: altura del muro pantalla.

Para todos los pilotes se obtiene una longitud de concreto mayor de 13 m, respetando la longitud de diseño. Además, las especificaciones técnicas de la empresa Camacho y Mora indican una longitud mínima de los pilotes dentro del terreno

natural de 10 m, la cual también se respeta desde la primera etapa.

Por último, todos los pilotes cumplen con el diámetro de sección transversal 80 cm y con el recubrimiento de 7,5 cm.

Pilotes del Bastión 2:

Los resultados de longitud de concreto de los pilotes del Bastión 2 se reportaron utilizando los datos facilitados por Geotraesa (“Cota fondo de excavación” y “Elevación del concreto”). Los cuales cumplieron con satisfacción los 11 m de longitud para todos los pilotes, además de respetar el diámetro de 60 cm y los 7,5 cm de recubrimiento. (Ver Cuadro 6).

Bastiones

Bastión 1:

Este bastión es del tipo Cabezal con Pilotes, y sus dimensiones se resumen en los cuadros del 24 al 28. En general, la construcción del Bastión 1 cumplió con las longitudes de elementos dibujadas en los planos, así como con los recubrimientos de 5 cm. Seguidamente, se hacen algunos comentarios.

La principal variación en cuanto a dimensiones se encuentra en la ubicación de las ménsulas, dado que en la vista frontal del Bastión 1 las ménsulas están corridas hacia la izquierda. En el Cuadro 24 de Verificación de geometría de Bastión 1(Planta), se indica que desde el borde aguas arriba de la tubería, hasta la ménsula, la medida debe ser 2,83 m, pero en campo fue de 2,93 m, además de que el frente del bastión midió 8,81 m y no 8,66 m. Como el espacio entre ménsulas se respeta (1,60 m), ambas ménsulas quedaron desplazadas.

A pesar de esto, se considera que la principal razón de este desplazamiento es que en planos no se representó la ubicación exacta de las placas de ménsulas, por lo cual se hizo necesario asumir que dichas placas iban centradas con las placas superiores en del puente, y al hacer esto no coincidió la distancia mencionada de 2,93 m.



Fotografía 37. Posición de ménsulas respecto a los puntales del puente en Bastión 1.

Después, debido a que detrás de este bastión hay un muro construido con anterioridad, no se construyeron los cabos de muro pantalla de 0,60 m x 0,30 m de ancho en Cuadro 24. Además, como dicho muro antiguo no es paralelo al Bastión 1, las distancias laterales de 4 m (Cuadro 24) se modificaron a 4,2 m aguas abajo de la tubería y 5,50 m aguas arriba de la tubería.

Por último, en el Cuadro 25 de Verificación de geometría de Bastión 1 (Frontal), se indica que la altura no es la estipulada en planos y esto es producto de la corrección de las cotas de elevación, las cuales son realmente 1 m menores, por lo que se redujo la altura del muro pantalla en 1 m, manteniendo el nivel de desplante.

Bastión 2:

Este bastión es del tipo Contrafuerte, y sus dimensiones se resumen en los cuadros 29 al 31. En general, la construcción del Bastión 2 cumplió con las longitudes de elementos dibujadas en los planos, así como recubrimiento de 5 cm. A continuación, se hacen algunos comentarios.

En el Cuadro 30 "Verificación de geometría de Bastión 2 (Lateral)", se indica que la altura del Bastión 2 desde nivel de placa hasta el pedestal es de 3,83 m (altura en planos producto de la corrección de cotas de elevación). A pesar de esto, en campo topografía determinó que se debían bajar 13 cm más, por lo que la altura final del Bastión dos es de 3,70 m.

Sí se cumplen todos los recubrimientos de 5 cm y de 7,5 cm para las placas de fundación, con el respectivo bisel de 2 cm. Sin embargo, el espaciamiento entre los dados de concreto es 11 cm mayor según el Cuadro 31.

Pautas geométricas contempladas

Importancia del recubrimiento:

El recubrimiento garantiza que el acero tenga suficiente concreto alrededor para que pueda desarrollar su adherencia con el concreto (la transferencia de carga en traslapes convencionales es por adherencia).

Además, protege al acero de los agentes externos corrosivos (sales en ambientes marinos, smog) y lo protege del fuego.

Comparación de normas pertinentes (Recubrimiento):

Cuadro 57. Recubrimiento requerido según norma.

Norma/Código/Documento	Valor (cm)
ACI 318-19 (Pilotes)	7,5
ACI 318-19 (Placas fundación)	7,5
ACI 318-19 (Expuestos)	5
CyM(Placas de fundación)	7,5
CyM(General)	5
AYA-1003	-
CR-2010 (General)	5
Obtenido en campo	5 y 7,5

CyM: Especificaciones técnicas para este proyecto de Camacho y Mora.

Tolerancias (Recubrimiento):

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(a):

Tolerancias para el recubrimiento especificado.

Cuadro 58. Tolerancia en recubrimiento ACI 318-19.

d (mm)	Tolerancia en el recubrimiento especificado (mm)
≤ 200	Menor de -10
	-1/3 del recubrimiento especificado
> 200	Menor de -13
	-1/3 del recubrimiento especificado
La tolerancia para el recubrimiento de la parte inferior del	

Fuente: American Concrete Institute. (2019).

Nota: La tolerancia para el recubrimiento de la parte inferior del miembro es -6mm.

Documento “Especificaciones técnicas de los materiales (1)” de Camacho y Mora:

La tolerancia para el recubrimiento no debe exceder de menos de 1/3 del recubrimiento mínimo requerido en los planos y especificaciones.

Tolerancias (Construcción):

AyA-1003:

Cuadro 59. Variación permitida en dimensiones.

Variaciones en la línea de construcción de la posición establecida en los planos y en la posición relativa de columnas, paredes y divisiones interiores.	En cualquier claro o 6 m máximo	En 12 m o más
		12 mm
Variaciones en las dimensiones de secciones transversales de columnas y vigas en los gruesos de losas y paredes	Menos	Más
	6 mm	12 mm
Fundaciones y placas: Variación de las dimensiones de los planos	Menos	Más
	12 mm	50 mm
Fundaciones y placas: Desplazamiento o excentricidad	2% del ancho de placa en la dirección del desplazamiento, pero no más de 50 mm	
Fundaciones y placas: Reducción en espesor	Menos de 5% del grueso especificado	

Armado: confección de armaduras

En esta sección se estudian los resultados obtenidos de cantidad de barras y aros, diámetro y configuración de las varillas, espaciamientos, el número de espacios en pilotes, distancias entre espaciadores de pilotes y tolerancias del armado.

Pilotes

Pilotes del Bastión 1:

Por las razones explicadas anteriormente, la armadura del primer pilote construido (P6) quedó muy por encima sobre el nivel de terreno, entorpeciendo el proceso de retiro del encamisado metálico justo después del colado y afectando el proceso de fraguado del concreto. Por tal motivo, el resto de pilotes se armaron en primera instancia solo con varillas de 12 m de largo, se colaron hasta nivel de terreno y después se completó el armado restante.

Los resultados de longitud de armadura de los pilotes del Bastión 1 se reportaron de la siguiente manera:

Primera etapa: se emplearon varillas de 12 m de largo.

Segunda etapa: longitud de armadura restante para llegar a lo indicado en planos.

Todos los pilotes del Bastión 1 cumplen con la cantidad y diámetro de barras longitudinales y aros circulares continuos transversales. Así como con el número de espaciamientos entre aros circulares continuos.



Fotografía 38. Verificación en campo de espaciado en aro circular continuo de pilotes.

Pilotes del Bastión 2:

Las longitudes de armadura de los pilotes del Bastión 2 son valores medidos en campo y fueron corroborados con los valores facilitados por Geotraesa. La longitud estipulada es de 11,9 m (que se derivan de 11 m rectos + 0,5 m de longitud de gancho estándar con doblez a 90° + 0,4 m de longitud después del doblez a 90°). Los pilotes 11, 12, 13 y 14 presentan menores longitudes a la estipulada, ya que fueron los primeros pilotes en armarse y ocurrieron ciertas confusiones a nivel de armado (ver cuadros 20, 21, 22 y 23), posteriormente la Inspección Oficial indicó la corrección para los pilotes restantes.

Todos los pilotes del Bastión 2 cumplen con la cantidad y diámetro de barras longitudinales y aros circulares continuos transversales. Así como con el número de espaciamientos entre aros circulares continuos.

Bastiones

Bastión 1:

El refuerzo presente de este bastión se resume en las tablas de la 32 a la 36. En general, la construcción del Bastión 1 cumplió con el acero de refuerzo dibujado en los planos y se hacen algunos comentarios a continuación.

Como se mencionó anteriormente, no se construyeron los cabos de muro pantalla en la parte de atrás (0,60 m y 0,30 m de ancho), por lo que tampoco se presenta el refuerzo correspondiente.

En el juego de planos actualizado, se incluye un refuerzo de 2#6 V-23 + aros #4 V-24 @10 cm, en forma de columna en la viga cabezal, el cual no se presentó, debido a que el diseñador incorporó este refuerzo cuando ya se había construido la viga cabezal. (Cuadro 32).

Bastión 2:

El refuerzo presente de este bastión se resume en los Cuadros de la 37 a la 41. En general, la construcción del Bastión 1 cumplió con el acero de refuerzo dibujado en los planos y se hacen algunos comentarios a continuación.

En el juego de planos actualizado, se incluye un refuerzo de 2#7 W-27 + aros #4 W-26 @10 cm, en forma de castillo en las columnas delanteras del cuerpo del bastión, el cual no se incluyó en el armado, debido a que esta modificación la realizó el diseñador cuando ya se había construido el bastión.

Pautas contempladas en el armado

Tolerancias (localización de refuerzo):

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(a) Tolerancias para d y el recubrimiento especificado:

d , mm	Tolerancia en d , mm	Tolerancia en el recubrimiento especificado del concreto, mm ^[1]
≤ 200	±10	Menor de -10
		-(1/3) x recubrimiento especificado
> 200	±13	Menor de -13
		-(1/3) x recubrimiento especificado

^[1]La tolerancia para el recubrimiento de la parte inferior del miembro es -6 mm.

Fuente: American Concrete Institute. (2019).

La tolerancia para el espaciamiento de estribos cerrados de confinamiento en miembros de sistemas sísmicos intermedios y especiales:

- El menor entre: +40 mm y +1,5 db de la menor barra longitudinal.
- El menor de: -25 mm por cada 30 cm de la menor dimensión del miembro y -75 mm.

AyA-1003 Tolerancia en la variación del espaciamiento en la colocación del refuerzo:

Variación del espaciamiento indicado: 25 mm.

Tolerancias (ubicación de espaciadores en pilotes):

CR-2010 565.06 "Acero de refuerzo para pilotes preexcavados y colocación de los tubos de acceso para la prueba de registros sísmicos cruzados":

Se debe atar firmemente los espaciadores del concreto y otros dispositivos de espaciamiento en las quintas partes, a lo largo del perímetro de la armadura y se debe espaciar en intervalos que no excedan los 3 metros, a lo largo de la longitud de la armadura.

Armado: detallado de refuerzo en campo (longitud de desarrollo)

Pilotes

Durante la construcción de pilotes, la longitud de gancho estándar "Lag" y longitud después de doblez "Lext" sí fueron empleadas, ya que los pilotes de ambos bastiones llegan a una viga cabezal donde presentan su anclaje por medio de un gancho estándar con doblez a 90°. También se empleó la longitud de anclaje recto "Lar" mediante traslapes en varillas longitudinales y en los aros

circulares continuos (espirales) de pilotes en ambos bastiones.

Como se mostró en las tablas Verificación de Acero Pilotes del Bastión 1 (Cuadros 8-14) y del Bastión 2 (Cuadros 16-23), los traslapes de barras respetaron en todo momento las especificaciones técnicas del proyecto (60 diámetros de varilla). Además, en dichas tablas se evidencia que se respeta “Lag” de 50 cm y “Lext” de 45 cm en pilotes del Bastión 1, así como “Lag” de 50 cm y “Lext” de 40 cm en pilotes del Bastión 2.

La especificación técnica AyA-1050 indica que para operaciones relacionadas con trabajos de concreto reforzado, se debe seguir las recomendaciones del ACI 318. Este código indica que el anclaje de los aros circulares continuos consiste en una vuelta adicional como se muestra en la siguiente imagen. Esto no se cumplió en los pilotes debido a que el diseño original contemplaba aros circulares individuales, por lo que dicho detalle de anclaje no se incluyó en planos.

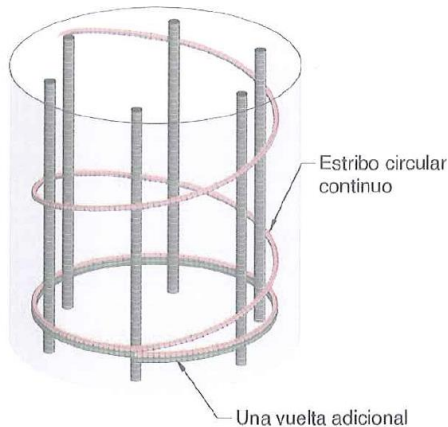


Figura 71. Requerimiento de anclaje para aros circulares continuos ACI 318-19.



Fotografía 39. Anclaje de aros circulares continuos de pilotes en campo.

Pilotes del Bastión 1:

En los pilotes del Bastión 1, se utilizó “Lar” debido al largo de sus armaduras (14,95 m) y a la cota de profundidad a la que se debía perforar. Como se explicó anteriormente, los pilotes del Bastión 1 se armaron en dos etapas, las cuales se unieron con el uso de traslapes en acero longitudinal y transversal.

Pilotes del Bastión 2:

Por otra parte, en los pilotes del Bastión 2 se empleó “Lar”, ya que se traslaparon varillas para confeccionar el anclaje en la cabeza de los pilotes con la respectiva longitud después del doblez a 90°. Sin embargo, este empalme generó mayor congestionamiento de acero en la cabeza de los pilotes (a nivel de placa de fundación y de vigas cabezal) dificultando el armado de estos últimos elementos, por lo que dichos dobleces a 90° no se realizaron con traslapes en pilotes del Bastión 1.

Además, se debe mencionar que el ACI 318-19 26.6.3.2(b) plantea evitar (siempre que se pueda) la práctica de doblar acero parcialmente embebido en el concreto, así como también lo hace la sección 6 de Especificaciones Técnicas AyA-1003.



Fotografía 40. Traslapes para confección de anclaje y dobléz a 90°.

sí se alternaron para evitar que quedaran alineados.

El CSCR-2010(14) indica que en elementos de concreto reforzado el traslape del refuerzo longitudinal se debe hacer de forma alternada.



Fotografía 41. Traslapes longitudinales sin alternar.

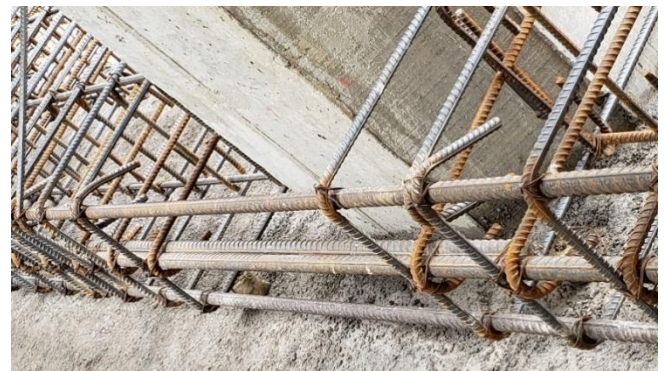
Bastiones

Bastión 1:

A diferencia del Bastión 2, el Bastión 1 no solo utilizó acero prefigurado ya que sufrió de la incorporación de elementos de concreto reforzado (a parte de las ménsulas que no estaban contempladas al inicio en ninguno de los dos bastiones). Esto implicó que los elementos adicionales como la viga inferior de fundación y la viga intermedia para las ménsulas sí muestren traslapes.

Conociendo lo anterior, la presencia de traslapes en sí no significa un problema para el comportamiento real vs diseñado de la estructura, puesto que se respetaron las longitudes de desarrollo (indicado en la Cuadro 41). Cabe mencionar que en el muro pantalla se realizaron ciertos dobleces (aunque tuviera destinado acero prefigurado para su armado). En el acero horizontal de este muro se hicieron dobleces con “laxt” ligeramente menor a lo indicado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010(CSCR-2010(14)) y ACI 318-19 (Ver Cuadro 41).

Asimismo, analizando la viga intermedia para ménsulas en Bastión 1, en la vista frontal los traslapes de las barras longitudinales #8 no están alternados (estos coinciden), en la vista posterior



Fotografía 42. Traslapes longitudinales alternados.

Bastión 2:

En el armado del Bastión 2, gracias a las dimensiones de este y debido a la utilización del acero prefigurado, no se emplearon empalmes y se redujo totalmente la necesidad de confeccionar dobleces en campo. La longitud de gancho estándar Lag no aplica al armado del Bastión 2, ya que no hay barras longitudinales llegando a un núcleo confinado. Se debe mencionar que las varillas prefiguradas con dobleces a 90° y 135°,

presentan “Lext” en planos y cumplen con ACI 318-19 y CSCR-2010(14).

transfiere la fuerza al refuerzo adyacente, simulando 1 sola varilla.

Pautas contempladas de longitud de desarrollo

Comparación de normas pertinentes (Longitudes de desarrollo):

Importancia de los traslapes:

El ingeniero Navarro (2020) explica que no se deben de tomar a la ligera, ya que los traslapes significan un punto de ruptura de integridad y continuidad estructural. Esto porque la transferencia de cargas del acero por traslape depende del concreto: el acero transmite las fuerzas al concreto por adherencia, y este a su vez

Cuadro 60. Comparación de traslape mínimo según normas aplicables.

Norma/Código/Documento	Valor
ACI 318-19	Valores calculados a continuación
CyM (7.6.2(F) División 1A AASHTO-2010)	60 diámetros de varilla
AYA-1003	24 diámetros de varilla
AYA-1050	Remite al ACI 318
CR-2010	Traslapes indicados en planos o sino ACI SP66
Obtenido en Campo	60 diámetros de varilla

Nota: “CyM” significa Especificaciones técnicas para este proyecto de Camacho y Mora.

Cuadro 61. Nombres para el mismo concepto en Código Sísmico de Costa Rica y ACI 318.

CSCR-2010	ACI 318
lag	ldh
lar	lst (T) o lsc (C)
lext	lext

(T): barras en tensión
(C): barras en compresión

ACI 308-19

Cuadro 62. Valores de longitud de desarrollo calculados según ACI 318-19.

Nota: estos resultados podrían no ser válidos para otros proyectos, ya que toman en cuenta características específicas de los materiales empleados en obra.

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Extensión recta "lext" después de dobléz (cm)			Longitud de gancho estándar "ldh"	Traslape "cm"		
		lext (90)	lext (135)	lext (180)		lst superior (tracción)	lst inferior (tracción)	lsc (compresión)
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	15,24	N.A	5,08 (6,5)	13,46	197,33	151,79	378,71
	No. 5	19,05	N.A	6,35 (6,5)	18,8	246,67	189,74	473,39
	No. 6	22,86	N.A	7,62	24,72	296	227,69	568,07
	No. 8	30,48	N.A	10,16	38,06	394,66	303,59	757,43
	No. 9	34,29	N.A	11,43	45,41	444	341,54	852,11
Aros	No. 3	5,72 (7,5)	5,72 (7,5)	3,81 (6,5)	N.A	N.A		
	No. 4	7,62	7,62	5,08 (6,5)	N.A	N.A		
	No. 5	9,525	9,525	6,35 (6,5)	N.A	N.A		
Aro Circular continuo	No. 5	1 vuelta adicional o igual a Lext en Aros			N.A	15		

CSCR-2010

Cuadro 63. Valores de longitud de desarrollo calculados según CSCR-2010(14).

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Extensión recta "lext" después de dobléz (cm)			Longitud de gancho estándar "lag" (#3 - #11) El mayor de:			Traslape "lar" (#3 - #11) (cm)	
		lext (90)	lext (135)	lext (180)	8 db	15 cm	$f_y db / 16 \sqrt{f'_c}$	lar superior (d>30cm)	lar inferior
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	15,24	N.A	5,08 (6,5)	13,46	15	19,92	69,72	49,8
	No. 5	19,05	N.A	6,35 (6,5)	18,8		24,9	87,15	62,25
	No. 6	22,86	N.A	7,62	24,72		29,89	104,615	74,725
	No. 8	30,48	N.A	10,16	38,06		40	140	100
	No. 9	34,29	N.A	11,43	45,41		44,83	158,935	113,525
Aros	No. 3	5,72 (7,5)	5,72 (7,5)	3,81 (6,5)	N.A			N.A	
	No. 4	7,62	7,62	5,08 (6,5)	N.A			N.A	
	No. 5	9,525	9,525	6,35 (6,5)	N.A			N.A	

Tolerancias (Longitud de desarrollo):

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(b):

Tolerancias para la ubicación longitudinal de los dobleces y extremos del refuerzo

Ubicación longitudinal	Tolerancia (mm)
Extremos discontinuos de ménsulas y cartelas	± 13
Extremos discontinuos de otros miembros	± 25
Otras ubicaciones	± 50

Fuente: American Concrete Institute. (2019).

Documento "Especificaciones técnicas de los materiales (1)" de Camacho y Mora:

La tolerancia en la localización de puntos de dobléz y extremos de barras de refuerzo, deben ser de 50 mm, excepto en los apoyos terminales de vigas, en los cuales no debe ser mayor de 12mm.

CSCR-2010(14):

- En elementos de concreto reforzado el traslape del refuerzo longitudinal se debe hacer de forma alternada.
- La distancia entre traslapes alternos debe ser mayor que 30 diámetros de barra de refuerzo.
- En ningún caso se puede traslapar más del 50% del refuerzo en tracción en una sección.
- La longitud de empalme por traslape de una barra sometida a tracción no será menor que 30 cm.

Calidad de materiales: Acero de refuerzo

La calidad del acero de refuerzo empleado para la construcción de pilotes y bastiones fue la indicada en las especificaciones técnicas de la empresa diseñadora Camacho y Mora, se utilizó varilla deformada de grado 60, de acuerdo con las designaciones ASTM A 615.

Los proveedores de acero de refuerzo presentaron su debido certificado que garantiza Grado: 60 y Norma: INTE C401:2017 en varillas longitudinales y en aros de bastiones y pilotes Grado: 60 y Norma: ASTM A706. Cabe mencionar que INTECO asegura la correspondencia entre ASTM A706 e INTE C401:2017.



Fotografía 43. Certificados del acero de refuerzo.

Calidad de materiales: Resistencia a la compresión del concreto

La resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de edad ($f'c$) se midió de acuerdo con ASTM C39, en cilindros moldeados, en campo de 150 x 300 mm ASTM C31, en ensayos de laboratorio elaborados por la empresa ITP.

El manual CR-2010 en la Subsección 552.03, en la Nota (v) indica que, hasta obtener la

resistencia a los 28 días del concreto, el diseño de mezcla en cuestión puede ser aprobado si los resultados de resistencia a la compresión a los 7 días son iguales o mayores al 85% de la resistencia requerida a los 28 días.

En general los resultados de $f'c$ contenidos en los cuadros 44 y 45 de pilotes y bastiones respectivamente, muestran valores satisfactorios que cumplen con $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ en pilotes y con $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ para bastiones.

Pilotes

Pilotes del Bastión 1:

Los resultados se muestran en la Cuadro 44. La primera etapa (primeros valores de Cuadro 44), corresponden a la primera porción de los pilotes, los cuales fueron colados hasta nivel de terreno. La segunda etapa (valores sobre nivel de terreno), corresponde la segunda porción de los pilotes, los cuales fueron colados sobre el nivel de terreno con el uso de encofrado. Se consideran resultados satisfactorios, debido al cumplimiento del CR-2010 552.03 (v), sobre el 85% de $f'c$ requerido.

Sin embargo, el Pilote 6 presenta un 85% del $f'c$ requerido, pero a los 14 días. Esto se debe a la complicación mencionada anteriormente que tuvo la pilotera para sacar el encamisado metálico, debido a la altura de la armadura del P6 sobre el nivel de terreno. Esto generó que se interrumpiera el proceso de fraguado inicial y dándose la mala práctica de remezclado del concreto.

Se hace necesario poner especial atención a este pilote, puesto que los resultados de ITP reflejan una muestra de dicho concreto que fue curada en ambiente de laboratorio, a diferencia del concreto en campo colocado en el Pilote 6, que es de esperarse que tenga aún menor resistencia.

Por último, se nota una tendencia de los valores $f'c$ a ser significativamente mayores a los requeridos, siendo el valor más alto 495 kg/cm^2 en comparación con los 350 kg/cm^2 requeridos. Este fenómeno se estudia a continuación en "Pautas contempladas $f'c$ ".

Pilotes del Bastión 2:

Todos los pilotes en este bastión fueron colados debajo del nivel de terreno, además, los resultados que se muestran en el Cuadro 44 son

satisfactorios en cuanto al valor meta de 350 kg/cm², debido al cumplimiento del CR-2010 552.03 (v), sobre el 85% de f'c requerido.

Bastiones 1 y 2

Los resultados se muestran en el Cuadro 45, los cuales se consideran satisfactorios debido a lo estipulado en el CR-2010 sobre que, si la resistencia a la compresión a los 7 días es igual o mayor al 85% de f'c requerida, el diseño de mezcla puede ser aprobado. Los resultados restantes están en espera.

Ahora, si bien es cierto que los resultados de f'c del Bastión 2 son mayores a 280 kg/cm² con solo 7 días de edad, no se debe asumir esto como un éxito total. Se hace necesario también analizar desde el punto de vista del análisis estructural de la estructura de los bastiones, como se explica a continuación.

Pautas contempladas de f'c

Importancia del control de f'c (Valor f'c y su relación con el comportamiento de bastiones):

En estructuras de concreto reforzado sometidas a solicitaciones laterales causadas por sismo, es importante analizar su comportamiento y cómo este se ve afectado por el valor f'c.

El ingeniero Peralta (2019) indica que las estructuras poseen por sí solas la capacidad de vibrar, esta capacidad es propia de cada sistema y depende exclusivamente de la rigidez y de la masa de un sistema estructural, es decir, el periodo de una estructura no depende del sismo.

Aclarado esto, es posible saber que los factores que modifiquen la rigidez y la masa de un sistema, estarán consecuentemente cambiando el periodo de este. Tal es el caso del valor f'c, el cuál es directamente proporcional al valor de Módulo de Elasticidad (E) del concreto, el cual a su vez modifica la rigidez del sistema (K). Además de que la resistencia del concreto afecta su peso específico (kg/m³), modificando el otro factor: la masa.

$$E = 15\,100 \cdot \sqrt{f'c} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$K = \frac{A \cdot E}{L}, \text{ barra sometida a tensión}$$

$$K = \frac{3EI}{L^3}, \text{ barra empotrada en voladizo}$$

$$K = \frac{48EI}{L^3}, \text{ barra simplemente apoyada con carga en el centro del claro}$$

De manera que entre más grande sea f'c, mayor será (E), incrementando la rigidez del sistema (y por su parte, también se incrementa la masa), valores que afectan directamente el periodo (T) de la estructura en cuestión. De modo tal que si la variación entre el f'c de diseño estructural y el f'c real del diseño de mezcla resultante de ASTM C39, es lo suficientemente cuantiosa, el periodo utilizado para obtener el Factor Espectral Dinámico (FED) en el CSCR-2010(14), podría dar como resultado un FED distinto al del diseño estructural. Si esto ocurre, el valor del Coeficiente Sísmico cambia (al ser directamente proporcional al FED) y por ende cambia también la fuerza sísmica horizontal actuante en la estructura de concreto reforzado, en este caso; los bastiones 1 y 2.

Comparación de normas pertinentes (Resistencia a la compresión del concreto):

Cuadro 64. Comparación de normas aplicables en cuanto a al concreto.

Norma/Código/ Documento	Frecuencia de muestreo	Cilindros por muestra	Moldeo	Ensayos f'c
ACI 318-19	Muestras 1 vez al día o muestras cada 110 m ³	2 cilindros (28 días)	ASTM C31	ASTM C39
Especif. Camacho y Mora	Muestras 1 vez al día o muestras cada 75 m ³	5 cilindros	ASTM C32	ASTM C39
AYA-1003	Muestras 1 vez al día	3 cilindros	ASTM C33	ASTM C39
AYA-1050	Muestras 1 vez al día o 1 cilindro cada 20m ³	6 cilindros por	ASTM C31	ASTM C39
CR-2010	muestra 1 vez al día o muestra cada 25 m ³	4 cilindros	AASHTO T23	AASHTO T22
Obtenido en Campo	muestras 1 vez al día o muestras cada 25 m ³	4 cilindros	ASTM C31	ASTM C39

Tolerancias (Resistencia a la compresión del concreto):

ACI 318-19, sección 26.12.3:

El promedio de las resistencias de tres muestras consecutivas debe ser igual o mayor a la resistencia especificada. (La resistencia de una muestra debe entenderse como el promedio de las

resistencias de dos cilindros de la misma mezcla de concreto).

- Si $f'c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$: Ninguna muestra individual puede tener una resistencia menor que la resistencia especificada menos 35 kg/cm^2
- Si $f'c > 350 \text{ kg/cm}^2$: Ninguna muestra individual puede tener una resistencia menor que $0,10 f'c$.

Probabilidad que ensayos de resistencia que no cumplan con estos criterios: 1/100. (ACI 214R).

CR-2010 Subsección 552.03 nota (v):

Hasta obtener la resistencia a los 28 días del concreto, el diseño de mezcla en cuestión puede ser aprobado si los resultados de resistencia a la compresión a los 7 días son iguales o mayores al 85% de la resistencia requerida a los 28 días.

Especificaciones de este proyecto:

La empresa Camacho y Mora indica si el promedio de cualquiera tres resultados de tres pruebas de resistencia consecutivos es menor que $f'c$ o si algún resultado de las pruebas de resistencia cae por debajo de $f'c$ por más de 3 Mpa (500 psi), tomar un mínimo de tres núcleos de prueba ASTM C 42 del sitio de trabajo representado por los resultados de cilindros de prueba bajo y probar.

El concreto representado por la prueba del núcleo deberá ser considerado estructuralmente adecuado si el promedio de los tres núcleos es igual al menos al 85 por ciento de $f'c$ y si ningún núcleo es menos que el 75 por ciento de $f'c$.

Calidad de los materiales: Temperatura de concreto fresco

En este proyecto, se tomó la temperatura del concreto fresco cada vez que se medía el revenimiento (cada 25 m³). La medición se hizo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C1064 "Método estándar para temperatura del concreto hidráulico fresco".

Como regla general, el ingeniero Cuevas (2019) indica que la temperatura del concreto fresco a la hora de la colocación no debe exceder los 32 °C, y en el manual CR-2010 se estipula que

debe estar entre los 10 °C y 30 °C. Lo anterior para evitar problemas relacionados con evaporación de agua, fraguado temprano, aparición de fisuras, entre otros.

Pilotes

En el Cuadro 44 se encuentran los datos de temperatura tomados en campo. En esta ocasión, se verifica que ninguna temperatura sobrepasó los 30 °C (a excepción del Pilote 1). La norma ASTM C1064 indica que se reportan los resultados a los 0,5 °C más cercanos, por lo que el concreto fresco que se utilizó en los pilotes 3, 8 y 9, así como en coladas sobre nivel de terreno en pilotes 4,5 y 6, tendrían una temperatura en estado fresco de 30 °C, la máxima permitida. (El Pilote 1 presenta 30,6 °C).



Fotografía 44. Temperatura del concreto fresco en Pilote 1 (30,6°C).

Bastiones

En el Cuadro 45 se encuentran los datos de temperatura tomados en campo. En esta ocasión, se verifica que ninguna temperatura sobrepasó los 30 °C, se obtuvieron temperaturas entre los 25 °C y 27 °C.

Pautas contempladas en la temperatura de concreto fresco

Importancia de la temperatura del concreto fresco:

La temperatura del concreto a la hora de colarse es una propiedad que altera la trabajabilidad, velocidad de fraguado, resistencia a la compresión y juega un papel importante en la aparición de grietas.

Afectación de la formación de cristales y su relación con la Resistencia a la compresión:

La mezcla de concreto presenta calor de hidratación debido a que este material es producto de una reacción exotérmica. Dicho calor se ve reflejado en los resultados de medición de temperatura, y entre mayor sea este calor, indica que la reacción está ocurriendo de manera más rápida, generando una mayor cantidad de cristales en las primeras horas (el concreto comienza a fraguar rápidamente). Sin embargo, debido a esta aceleración en la reacción, los cristales formados no se desarrollan lo suficiente en cuanto a tamaño, generando un concreto con una matriz de cristales más pequeños y menos entrelazado entre sí (porosidad), en comparación con la matriz de un concreto a menores temperaturas. IMCYC (2007) indica que este tipo de concretos probablemente tengan resistencias superiores en edades tempranas, pero su comportamiento mecánico en edades avanzadas dará resistencias a la compresión más bajas.

Temperatura a edades tempranas y su relación con la formación de grietas:

En las mezclas de concreto, al producirse el calor de hidratación en las primeras horas y días, se genera un gradiente de temperatura entre el interior del elemento colado y la superficie de este expuesta al ambiente, en donde la superficie al estar expuesta a menor temperatura se contrae, mientras que la sección interna se contrae más lentamente. El gradiente puede ser tal, que dicha restricción genere incompatibilidad de deformaciones, que resulta en agrietamiento por contracción térmica en la parte más fría.

Estas fisuras se pueden evitar aplicando un adecuado proceso de curado al concreto.

Comparación de normas pertinentes (Temperatura del concreto fresco):

Cuadro 65. Requerimientos para temperatura de concreto fresco.

Norma/Código/Documento	Frecuencia de muestreo	Temperaturas permitidas (°C)	Norma
ACI 318-19 (ACI 301)	---	Máx 35	-
Especif. Camacho y Mora AYA-1003	Cada 7,5 m ³ o cada vez que se moldeen cilindros	-	-
CR-2010	Primera batida	10-30	Termómetro
Obtenido en Campo	Muestras 1 vez al día o muestras cada 25 m ³	Datos en campo	ASTM 1064

Calidad de los materiales: Revenimiento de concreto fresco

En este proyecto, se tomó el revenimiento del fresco cada 25 m³. La medición se hizo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C143 "Método estándar para revenimiento de concreto hidráulico".

El revenimiento del concreto es una característica propia del diseño de mezcla que se generó en función de la necesidad de la trabajabilidad del concreto fresco, dependiendo de las condiciones que muestre el elemento a colar (dimensiones, acero de refuerzo y espacios libres). A pesar de esto, tampoco se debe permitir cualquier valor de revenimiento para cualquier tipo de concreto, puesto que no todos los concretos serán capaces de tener altos revenimientos sin presentar segregación de sus agregados hacia el fondo de los elementos colados.

Pilotes

Los resultados de revenimiento de pilotes se encuentran en el Cuadro 44, todo estos se encuentran entre 22 cm y 26 cm. Estos valores son requeridos para que el concreto fluya verticalmente de manera libre por la armadura de los pilotes.

El primer informe de ITP indica un revenimiento de 6,5 cm en el Pilote 7 sin embargo, en campo se registró un revenimiento de 26 cm. Seguramente se debe a un error de digitación.

El CR-2010 Subsección 565.07 indica que para pilotes preexcavados colados en sitio se permite un revenimiento de $17,5 \pm 2,5$ cm (concreto estructural Clase A). Cabe mencionar que las especificaciones técnicas de Camacho y Mora indican un concreto Clase B para pilotes y bastiones. Para el concreto estructural Clase B, el CR-2010 Subsección 552.03 (Tabla 552-1) indica un revenimiento de 5 a 10 cm, sin embargo, es necesario un revenimiento mayor a este último para poder colar pilotes sin dificultades.

Bastiones

Los resultados de revenimiento de pilotes se encuentran en el Cuadro 45, todo estos se encuentran entre 11 cm y 22 cm. Estos valores son menores, porque no se requería de una trabajabilidad tan alta para el colado de los bastiones.

Pautas contempladas en el revenimiento del concreto fresco

Comparación de normas pertinentes (Revenimiento del concreto fresco):

Norma/Código/Documento	Frecuencia de muestreo	Valor (cm)	Norma
ACI 318-19	-	-	-
Especif. Camacho y Mora	Cada 7,5 m ³ o cada vez que se moldeen cilindros	13	ASTM C-143
AYA-1003 (Concreto vibrado)	cada 20 m ³	3-8	ASTM C-143
CR-2010 (Concreto clase B)	1 muestra por carga (AASHTO T141)	5-10	AASHTO T119
CR-2010 (Pilotes sin fluidos)	1 muestra por carga (AASHTO T141)	Pilotes: 17,5+/-2,5	AASHTO T119
Obtenido en Campo	Muestras 1 vez al día o muestras cada 25 m ³	Datos en campo	ASTM C-143

Calidad de los materiales: Crosshole Sonic Logging

La prueba de pulso ultrasónico Crosshole fue realizada por la empresa especializada MYV Soluciones Geotécnicas, quienes prepararon varios informes de resultados de la condición de los pilotes. Estos resultados se resumen en el Cuadro 46.

En dichos informes se indica que los principales pilotes afectados fueron el P1 y el P3, con una primera calificación de P/F (Pobre/Falla). Sin embargo, días después se les volvió a practicar la prueba y obtuvieron calificación de Q (Cuestionable), es decir, aceptables según criterios de MYV.

Dicha empresa indicó que las pérdidas de velocidad en longitudes cortas son consecuencia de que el concreto aún esté desarrollándose. Por lo que se debe esperar algunos días para que el concreto evidencie una mejoría en la resistencia, tal fue el caso de la segunda prueba realizada en P1 y P3 16 días después.

Extracto de Cuadro 46:

Pilote	Número de prueba	Edad del concreto del pilote (días)	Clasificación de la condición del concreto
1	1	13	P/F
3	1	11	P/F
1	2	29	Q
3	2	27	Q

Observaciones
P1 presentó temperatura de concreto fresco de 30,6 °C
P3 presentó temperatura de concreto fresco de 29,7 °C

Se observa que los pilotes en cuestión tuvieron las temperaturas más altas en estado fresco, presentando dificultades para el desarrollo de resistencia en edades tardías del concreto y porosidad. Estos resultados de la dificultad para desarrollar resistencia en edades avanzadas y de matrices porosas son congruentes con lo analizado en “Afectación de la formación de cristales y su relación con la Resistencia a la compresión”.

Por último, el Pilote 6 tiene una calificación de Q, a pesar de las dificultades constructivas mencionadas con el retiro del encamisado metálico durante el fraguado del concreto. En el Cuadro 47 se observa que este Pilote 6 tuvo una longitud de prueba Crosshole de tan solo 6,2 m, esto porque se detectó un ducto bloqueado desde los 6 m.

A causa de lo anterior, se aplicó la prueba PIT (Pile Integrity Test) en el Pilote 6 para complementar la información faltante de la prueba de Crosshole. PIT indicó una longitud promedio de pilote igual a 10,92 m con una afectación del 4-7%.

MYV (2021c) concluyó que el pilote no presenta ni ensanchamientos ni estrangulamientos en la profundidad del mismo, por lo que el pilote es válido basándose en ambas pruebas.

Análisis del comportamiento de estructura metálica

En primera instancia, se debe señalar la deflexión final de la estructura metálica una vez cargada con la tubería no era conocida al inicio del proyecto, y la empresa encargada del diseño, no revisó estos valores hasta que ya se había comenzado la construcción de los bastiones.

Estos valores no se dieron a conocer hasta el día antes de comenzar con el proceso de Precarga. Por esta razón, en este documento se desarrolló el procedimiento para conocer el

comportamiento de deflexión que presentaría la cercha ante la carga con la tubería, y de esta manera establecer un valor meta al cual se debía llegar y un estándar con el cual comparar los resultados obtenidos en campo.

Este procedimiento se realizó meses antes de que la empresa diseñadora compartiera sus resultados. A continuación, se comparan los valores obtenidos de ambas partes

Cuadro 66. Comparación entre valores de deflexión calculados.

Escenario	Deflexión en el centro (cm)	
	Autor	Empresa CyM
Peso Propio (Puente)	3,2	4-7
Puente + Tubería	10,6	8-12
Efecto Torsión	5,7	4

Cuadro 67. Valores reales de deflexión en campo.

Escenario	Deflexión en el centro (cm)	
	Autor	Valore reales: Topografía
Peso Propio (Puente)	3,2	5,5 (promedio)
Puente + Tubería	10,6	11,36
Efecto Torsión	5,7	10,04 (valor anterior 5,31)

Nota: Una vez elevada la tubería sobre las pilas existentes, el valor de Efecto Torsión era de 5,31 cm. Sin embargo, se siguió deformando el puente con la tubería hasta percibir visualmente que se había levantado en la pila C, dando como resultado 10,04 cm.

Los resultados obtenidos a partir del modelo estructural desarrollado y del análisis de deflexiones realizado en el software Autodesk Robot, son congruentes con los valores reales en campo medidos por el topógrafo. A continuación, se exponen las fuentes de incertidumbre identificadas durante el proceso de montaje del puente y de precarga, así como durante el modelado en software.

Se observó en campo que las medidas de deflexión varían con la temperatura ambiente en que se efectuaron, dando como resultado una mayor deflexión a temperaturas altas (medio día), que a temperaturas más bajas en comparación (al final de la tarde). Este fenómeno es conocido como dilatación y contracción térmica, el cual se percibe en la estructura estudiada por su

geometría (un claro de 62,42 m) y por el material de los elementos que componen la estructura (acero). El cambio de longitud de los elementos (deformación) provocada por variaciones de temperatura, genera un cambio de esfuerzos que llegan hasta los apoyos del puente (placas de neopreno), los cuales permiten la rotación de la estructura metálica apoyada en los dos bastiones. Estas placas de neopreno fueron consideradas como articulaciones en el modelo de software como se explicó en la metodología.

Otra consideración es que la tubería se modeló como la aplicación de cargas en la estructura metálica, por lo que la rigidez del sistema “tubería” no se contempló como tal, ni su interacción con la cercha. Cabe mencionar que la implementación de este sistema al modelo es compleja debido a

variables presentes en el escenario a modelar, tal como las silletas sobre las vigas del puente para acoplar la tubería, el empotramiento del tubo en sus extremos (se encuentra bajo tierra) y que la tubería cuenta con juntas de expansión en los extremos. Por tales consideraciones, también se requiere de simplificaciones a la hora de implementarlo en el modelo, tal fue el caso de la empresa Camacho y Mora, que hizo la añadidura de la tubería en el modelo con el fin de conocer la interacción tubo-puente en el proceso de precarga, dando como resultado deformaciones en el tubo que distan en comparación con lo que sucedió en campo.

Por otro lado, como se mencionó en el análisis de montaje de estructura metálica y precarga del puente, existió una torsión previa de 0,7 cm en el puente. Es decir, ya había una deformación previa al momento en que el puente se encontraba ensamblado sobre las torres temporales (momento en que la deflexión debía ser 0 cm). Este acontecimiento también representa una razón por la cual varían los resultados de “Efecto Torsión” reales de los previstos en Autodesk Robot. Además, al momento en que la tubería se había elevado 2 mm de la columna existente el punto C, el efecto torsión era de 5,31 cm (cerca al valor previsto de 5,7 cm). Si embargo, se decidió seguir deformando el puente con la tubería mediante las gatas hasta percibir visualmente que la tubería se había levantado en C, hasta pasar de 2 mm a 7,8 mm, y el “Efecto Torsión” se elevó de 5,31 cm a 10,04 cm.

Por último, siempre es necesario corroborar los datos que dan los programas con cálculo a mano. Como resultado de esta acción, se comprobó el que peso propio de la estructura metálica considerado por Autodesk Robot era menor al calculado a mano (en Excel). Debido a esto, era de esperarse una mayor deflexión en campo generada por el peso propio del puente. Esta diferencia se “arrastra” y también se refleja en el valor final de deflexión una vez que el puente fue cargado con la tubería.

En cuanto al proceso de transferencia de carga al puente, el método de precarga aplicado permitió la aplicación de carga de manera gradual al puente, sin embargo, el procedimiento de demolición inicial propuesto (expuesto en los resultados) consideraba la no deformación de la tubería, así como un modelo de software con menor grado de incertidumbre que el utilizado por la empresa diseñadora. Además, el proceso de

precarga ejecutado causó que los tornillos para ajustar la altura en las silletas tomaran la carga, lo cual no es correcto puesto que estos no fueron diseñados para tal fin, por lo que se observó cierta deformación de las silletas en las zonas cercanas a los tornillos de ajuste.

La deformación en el tubo durante el proceso de precarga (desplazamiento vertical del tubo hacia arriba relativo al puente), fue mayor en el centro y menor en los extremos, dando forma de arco invertido según indican las mediciones topográficas en cada gata. La mayor deformación registrada en la tubería fue de 20,4 mm en la gata 2 y 15,2 mm en la gata 3 (ver ubicación de gatas en Figura 39).

Las deformaciones impuestas al tubo fueron tales que se logró cargar completamente el puente con la tubería sin afectar la integridad de esta o su funcionamiento hidráulico. Considerando que los desplazamientos verticales provocados en el tubo fueron en el orden de milímetros y que el tramo de tubería soportado por el puente es de 62,42 m, se contempla que la afectación de su pendiente fue mínima. Además, es posible ver cómo la tubería sigue la línea de tendencia lineal en el perfil topográfico final (ver anexo A), aún con el eje “Y” aumentado para ver mejor las desviaciones en la posición de la tubería.

Propuesta de mejoramiento en transferencia de carga al puente

Se ideó esta propuesta de mejora al proceso de transferencia de carga ejecutado basado en la observación de campo.

- La estructura metálica fue confeccionada en tramos, los cuales se ensamblaron sobre los dos bastiones construidos y sobre las torres temporales, dando posición exacta al puente (contraflecha de 31,1 cm).
- Una vez en posición, se retiran las torres temporales y actúa el peso propio de la estructura metálica (la tubería todavía es soportada por los apoyos existentes B, C y D).
- Llegado este punto, se ajusta la altura de las siete silletas del puente para que estas

apenas hagan contacto con la tubería (las silletas aún no reciben carga).

- Se confeccionan elementos metálicos (viguetas) para calzar cada silleta por debajo y así evitar que los tornillos de ajuste se dañen cuando las silletas tomen carga.
- Se socan las tuercas de las silletas para que estas tomen carga de la tubería, en conjunto con los apoyos existentes B, C y D.
- Siguiendo el orden “Propuesta de demolición” definido más adelante, se cortan las placas de apoyo temporales en C y D instaladas durante el proceso de montaje, y se retiran los cables en B.
- Importante: Se debe instalar un gato hidráulico (o más de uno) entre la tubería y la pila existente, cerca de la placa de apoyo que se vaya a cortar, y así cuando se corta la placa se puede ir bajando la altura del gato de manera gradual hasta que solo la silleta tome la carga. De esta manera se evita un golpe brusco en el puente y la tubería.

mediante la aplicación de cargas a las 7 silletas, las cuales van variando conforme se van demoliendo los apoyos intermedios que sostienen directamente la tubería. Estas cargas cambian porque al demoler los apoyos, el ancho tributario de cada silleta aumenta, como se muestra en el Apéndice A: Cálculo de Cargas.

NOTA: no se consideró la Carga Temporal de diseño, ya que para esta fase de montaje y demolición no se espera la acción de la carga temporal de uso. Esta última será considerada para la fase de operación de la estructura.

Estructura con apoyos intermedios y torres temporales.

La Figura 72 es el esquema de montaje de la estructura con la posición de los apoyos intermedios existentes que sostienen directamente la tubería (cables en B, y pilas C y D), así como las torres temporales que sostienen el puente (T1, T2, T3, T4, T5 y T6).

Seguidamente, se muestran las deflexiones más importantes presentes en el puente tipo cercha, así como la reducción de contraflecha final. Se recreó la secuencia de demolición de pilas existentes mencionada en la Metodología y se revisaron las alternativas de demolición propuestas.

Propuesta de demolición

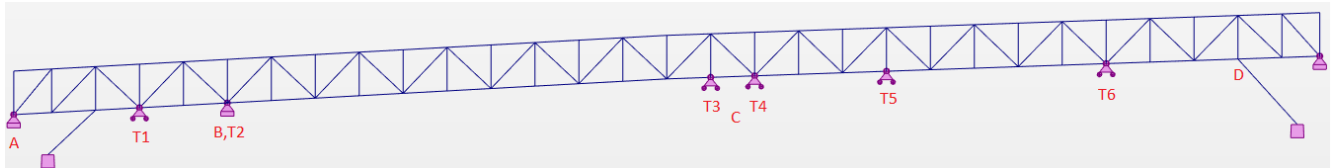


Figura 72. Modelado del escenario real. *Elaborado en Autodesk Robot.*

Debido a que al principio de la ejecución del proyecto no existía un plan de demolición de apoyos intermedios para transferir la carga al puente, se desarrolló esta propuesta.

Representación en Autodesk Robot

Se modelaron los escenarios a los que se enfrentará la cercha conforme sean demolidos los apoyos existentes. En el modelo se representó

Propuesta de demolición BCD:

En esta secuencia, una que vez se ha ensamblado la totalidad de la cercha sobre las torres temporales y bastiones 1 y 2, se retiran las torres temporales y actúa el peso propio del puente (PP). Después se hace contacto entre las silletas del

puente y la tubería y finalmente se demuelen los apoyos existentes en el orden: B, después C y por último D. Esto con el fin de conocer la manera más gradual de hacer la transferencia de carga al puente.

Cuadro 68. Reducción de contraflecha en propuesta BCD.

Carga sobre puente	B	C	D	Torres Temporales	Reducción de contraflecha cm (Deflexión en el centro)	Valor de contraflecha
PP	X	X	X	X	0	31,1
PP	X	X	X		3,17	27,93
PP+Tubería	X	X	X		9,08	22,02
PP+Tubería		X	X		9,4	21,7
PP+Tubería			X		10,48	20,62
PP+Tubería	Sin apoyos intermedios (reducción de contraflecha final)				10,6	20,5

Propuesta de demolición DBC:

En esta secuencia, una que vez se ha ensamblado la totalidad de la cercha sobre las torres temporales y bastiones 1 y 2, se retiran las torres temporales y actúa el peso propio del puente (PP). Después se hace contacto entre las silletas del

puente y la tubería y finalmente se demuelen los apoyos existentes en el orden: D, después B y por último C. Esto con el fin de conocer la manera más gradual de hacer la transferencia de carga al puente.

Cuadro 69. Reducción de contraflecha en propuesta DBC.

Carga sobre puente	B	C	D	Torres Temporales	Reducción de contraflecha cm (Deflexión en el centro)	Valor de contraflecha
PP	X	X	X	X	0	31,1
PP	X	X	X		3,17	27,93
PP+Tubería	X	X	X		9,08	22,02
PP+Tubería	X	X			9,2	21,9
PP+Tubería		X			9,52	21,58
PP+Tubería	Sin apoyos intermedios (reducción de contraflecha final)				10,6	20,5

Propuesta de demolición DCB:

En esta secuencia, una que vez se ha ensamblado la totalidad de la cercha sobre las torres temporales y bastiones 1 y 2, se retiran las torres temporales y actúa el peso propio del puente (PP). Después se hace contacto entre las silletas del

puente y la tubería y finalmente se demuelen los apoyos existentes en el orden: D, después C y por último B. Esto con el fin de conocer la manera más gradual de hacer la transferencia de carga al puente.

Cuadro 70. Reducción de contraflecha en propuesta DCB.

Carga sobre puente	B	C	D	Torres Temporales	Reducción de contraflecha cm (Deflexión en el centro)	Valor de contraflecha
PP	X	X	X	X	0	31,1
PP	X	X	X		3,17	27,93
PP+Tubería	X	X	X		9,08	22,02
PP+Tubería		X	X		9,2	21,9
PP+Tubería	X				10,28	20,82
PP+Tubería	Sin apoyos intermedios (reducción de contraflecha final)				10,6	20,5

Comparación de alternativas

En la siguiente figura se representa de manera gráfica la magnitud en que se reduce la contraflecha (en centímetros), a medida que se demuelen los apoyos intermedios existentes. Se grafica para cada alternativa de demolición propuestas anteriormente.

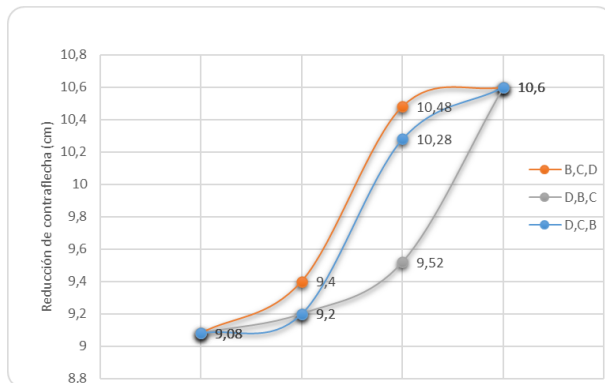


Figura 73. Reducción de contraflecha a medida que se demuelen apoyos intermedios para tres alternativas propuestas.

Cuadro 71. Coeficiente de determinación en modelo lineal de la reducción de contraflecha para cada propuesta.

Propuesta	R ²
BCD	0,9097
DBC	0,8287
DCB	0,9097

Para que la estructura no sufra cambios bruscos de carga y deformación durante la demolición de apoyos intermedios, se requiere que la transferencia de carga sea aplicada lo más gradualmente posible. Para cumplir con lo anterior se debe escoger la alternativa cuya gráfica presente el comportamiento más acercado al lineal y con la pendiente más constante, lo cual se corrobora con el coeficiente de determinación R² para modelo lineal más cercano a 1.

Cumpliendo con lo anterior **se escoge la alternativa DCB**: primero cortar placa de apoyo en D, después en C y por último retirar cables en B (gráfica representada en color azul).

La alternativa BCD presenta el mismo valor de R2, sin embargo, la alternativa escogida tiene

menores deflexiones al demoler los primeros dos apoyos intermedios D y C.

La siguiente imagen representa la manera en que se transfiere la carga al puente conforme se van demoliendo los apoyos en la propuesta DCB: Con apoyos intermedios BCD, BC, B y finalmente sin apoyos intermedios.

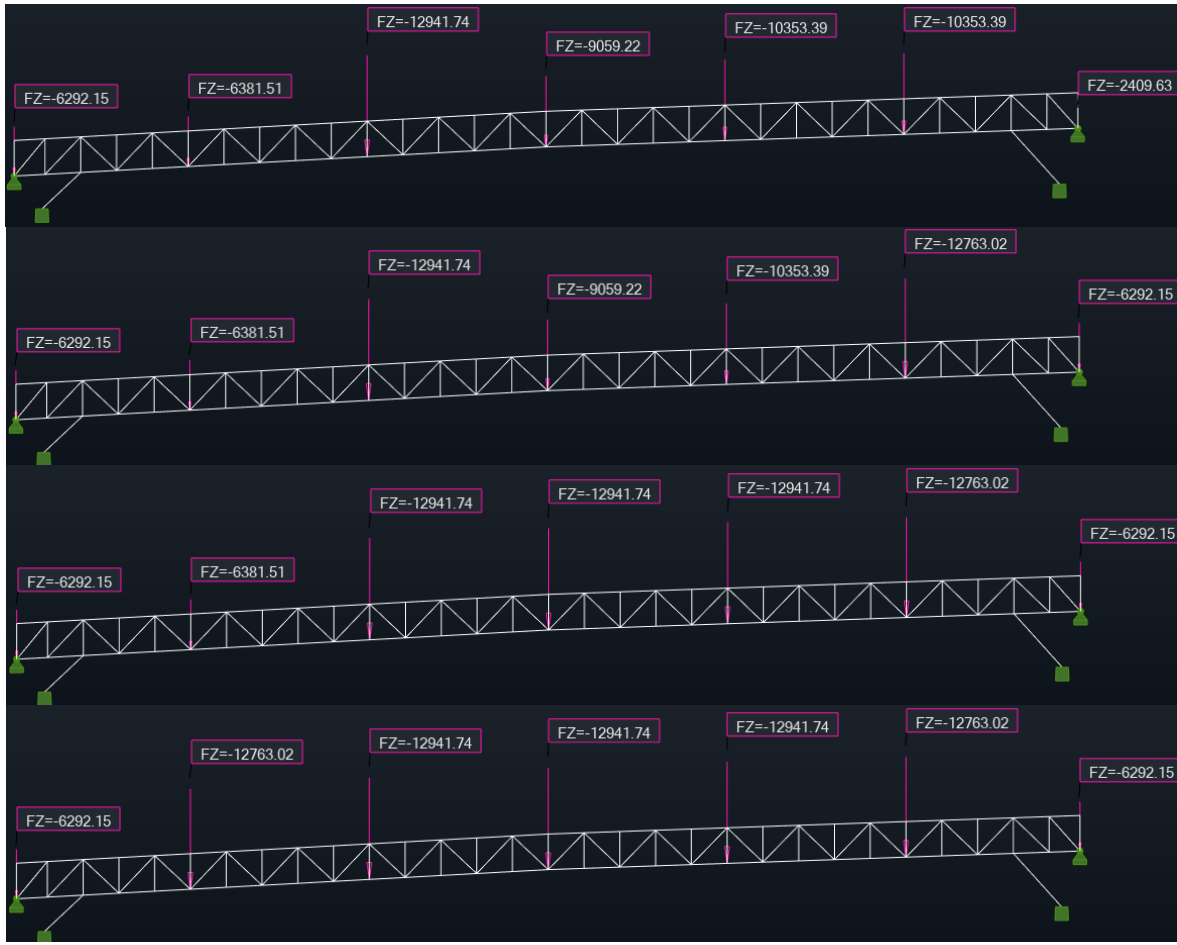


Figura 74. Transferencia de carga al puente en la propuesta DCB. Elaborado en Autodesk Robot.

Conclusiones

Plan de construcción y proceso constructivo

El proceso constructivo cumplió con los planes de construcción, así como las normas aplicables que fueron mencionadas durante el desarrollo de este documento. Los fallos descritos en el análisis de resultados en relación con el plan y el proceso constructivo no tuvieron consecuencias que afectaran de manera definitiva el funcionamiento del puente o la seguridad de la estructura.

De esta manera, todos los resultados obtenidos durante la ejecución tuvieron el visto bueno de los profesionales encargados y de la inspección oficial. Sin embargo, se determinaron opciones de mejora de algunas actividades según las normas descritas para cumplir en futuros proyectos.

Tal es el caso del flujo de trabajo en la perforación-colado de pilotes en donde se debía respetar 5 metros para perforar antes de las 20 horas después del colado, la consolidación de los 3 metros superiores del concreto del pilote con equipo de vibración, la presencia de una vuelta extra en los aros circulares continuos de los pilotes y las dimensiones finales de algunos elementos de los bastiones.

Una de las principales razones que provocaron atrasos y retrabajos en el proceso constructivo corresponde las actualizaciones en los planos, a cargo de la empresa diseñadora, lo cual incrementó en un mes y una semana (38 días) la duración de la construcción de los bastiones en comparación con lo planeado.

En la perforación de pilotes y en el armado de bastiones únicamente se solicitó el servicio profesional Topografía a modo de revisión final, por lo que no se logró conservar la precisión del replanteo topográfico en las perforaciones, el mayor desplazamiento de pilotes respecto a su posición de replanteo corresponde a 20 cm en el Pilote 11 en dirección al Pilote 12 (Bastión 2). Por

la misma razón, las desviaciones del armado de los bastiones no se corrigieron hasta que ya se había terminado la tarea, por lo que se tuvo que repetir.

Inspección estructural

El proceso de inspección de los dos bastiones y de los catorce pilotes determinó que la construcción de la subestructura en concreto reforzado del puente acató los lineamientos del juego de planos actualizado y especificaciones técnicas.

A manera general, se cumplió con la geometría de cada uno de los elementos mencionados que componen la subestructura. No obstante, resaltan ciertos valores que difieren de los planos, como el aumento de longitud frontal del Bastión 1 y el desplazamiento de las ménsulas de este bastión con respecto a los puntales de la estructura metálica del puente. También se deben mencionar los cambios a propósito en la geometría del muro pantalla respecto a los planos, con el fin de adaptar el Bastión 1 al muro existente en la parte trasera de este.

En el Bastión 2, debido a la corrección de cotas de elevación y a las indicaciones de topografía, se hicieron importantes cambios respecto a los planos iniciales y actualizados. Estos consisten en el reacomodo del acero y la modificación de la altura final, la cual fue de 3,7 m desde nivel superior de placa de fundación al pedestal, en comparación con los 3,83 m del plano actualizado. Por el mismo motivo, la superficie plana horizontal en la parte superior de los contrafuertes es de 60 cm y no de 15 cm como se muestra en estos planos.

En relación con el apartado de armado, el proceso de confección de armaduras de acero de refuerzo cumplió con la cantidad de varillas y el diámetro de estas, así como los aros y su espaciamiento en la construcción de pilotes y bastiones, también se respetaron las tolerancias

de localización de refuerzo citadas. El acero que no se presentó corresponde a los aros extra en pilotes del Bastión 1, avalado por la empresa encargada del diseño.

Siguiendo con el mismo apartado de armado, las longitudes de desarrollo siempre se cumplieron con los traslapes requeridos de 60 diámetros de barra y se evidenció que en el anclaje de aros circulares continuos no se confeccionó la vuelta extra en los extremos de las armaduras de los pilotes según ACI-318-19, esta indicación no se incluyó en planos o especificaciones técnicas.

La calidad de los materiales empleados para la construcción de pilotes y bastiones fue la indicada en las especificaciones técnicas de la empresa consultora Camacho y Mora. El acero de refuerzo presentó su debido certificado que asegura Grado: 60 y Norma: INTE C401 2017 en varillas longitudinales y en aros Grado: 60 y Norma: ASTM A706.

Todas las resistencias del concreto empleado en campo cumplieron de acuerdo con lo estipulado en los informes de calidad de la empresa ITP. Sin embargo, se debe poner especial atención al valor f_c del Pilote 6, debido a que no presentó un 85% de la resistencia requerida hasta los 14 días de edad y no a los 7 días como estipula el manual CR-2010. Esta dificultad en el desarrollo de su resistencia se atribuye a la complicación para retirar el encamisado, lo cual interrumpió el fraguado inicial del concreto durante el proceso constructivo del 11 de junio.

Se notó que los valores f_c tienden a ser significativamente mayores a los requeridos. De modo tal que si la variación entre el f_c de diseño estructural y el f_c real es lo suficientemente cuantiosa, el periodo real de la estructura sería distinto, lo que cambia el FED y por lo tanto la fuerza sísmica real actuante en la estructura. Este fenómeno se estudia en "Pautas contempladas f_c " del Análisis de resultados.

Por último, las pruebas de Crosshole para determinar la homogeneidad e integridad del concreto en la longitud los pilotes, indicó que la calidad obtenida en el concreto de los pilotes varía entre carácter "Bueno" y "Aceptable", según los criterios de la empresa MYV Soluciones Geotécnicas, por lo que todos los pilotes fueron aceptados. Se observó la relación entre las altas temperaturas de concreto fresco en los pilotes 1 y 3 con las calificaciones iniciales de Crosshole

Pobre/Falla. Estos presentaron porosidad en edades tempranas y dificultades para el desarrollo de resistencia en edades tardías del concreto, tal como se analizó en Calidad de los materiales: temperatura del concreto fresco.

Comportamiento de la estructura metálica

Se logró determinar con antelación los valores de deflexión esperados del puente de manera consecuente con lo sucedido posteriormente en campo. Esto a pesar de los factores que varían el valor de deflexión obtenido en obra, tal como condiciones de temperatura en campo, las variables relacionadas a los procesos de montaje y precarga de la estructura, así como el proceso mismo de modelado estructural 3D en software.

Al establecer el valor meta de deflexión final 10,6 cm se hizo posible comparar los resultados prácticos con los teóricos, y de esta manera se se determinó que el proceso constructivo seguido fue el adecuado para que la estructura metálica se comportara según previsto. A pesar de los desperfectos en los planes de construcción y en el proceso constructivo analizados a lo largo de este documento, la estructura metálica presentó una deflexión de 11,36 cm en el centro del claro aguas arriba, punto en donde la flexión y torsión surten mayor efecto, conservando una contraflecha de 19,74 cm y una diferencia de elevación entre extremos de la sección transversal en el centro debido a la torsión de 10,04 cm.

No se debe perder de vista que este proyecto de construcción se ejecutó con el fin de dar apoyo a la tubería y eximirla de su vulnerabilidad respecto al río Aguacaliente, tratando de evitar cualquier alteración en la tubería durante el proceso. Por tal motivo los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, ya que la estructura metálica mantiene contraflecha después de cargada, además otorga seguridad a la tubería sin haberle generado cambios abruptos durante el proceso constructivo, ni alteraciones permanentes significativas en su posición, elevación y pendiente, tales que pudieran afectar el funcionamiento hidráulico del acueducto.

Recomendaciones

A la Unidad de Puentes de Constructora MECO:

- Revisar con detenimiento los planes de construcción en comparación con las normas de acatamiento obligatorio según el proyecto, permite determinar de manera conjunta con los profesionales involucrados falencias y falta de información, así como identificar procesos que no cumplen con dicha normativa que podrían afectar la calidad del producto final.
- Tener en cuenta las tolerancias citadas en este documento (dimensiones finales de elementos, posición del armado, detallado de refuerzo, temperatura y revenimiento de concreto fresco), según apliquen a cada actividad realizada. Esto con el fin de establecer un marco de referencia que permita evaluar de manera objetiva los resultados del trabajo en campo de los futuros proyectos.
- Seguir las disposiciones presentes en la División 550 del Manual CR-2010, específicamente la sección 565.05 (a), con el fin de determinar un flujo de “perforación-colado” de pilotes en cada proyecto que respete este requerimiento: “Durante por lo menos 20 horas, no se deben excavar pilotes adicionales, permitir cargas de llantas excesivas o permitir vibraciones excesivas a 5 m ó 3 veces el diámetro del pilote, el que sea mayor, de un pilote recién construido”.
- Implementar la “Propuesta de mejoramiento en el izaje de armaduras de pilotes” desarrollada en el análisis de resultados del Plan de pilotaje. Esta busca ejecutar un proceso de izado limpio y reducir los daños por flexión en la armadura del pilote y los tubos de la prueba Crosshole.
- Solicitar mayor presencia del servicio profesional de Topografía que brinda MECO, para que corrobore de manera activa las actividades de perforación de pilotes y armado de estructuras en futuros proyectos, con el fin de aumentar la precisión de los resultados y disminuir los retrabajos durante el proceso constructivo.
- Logar que los traslapes longitudinales queden alternados en el armado del acero de refuerzo, según indica CSCR 2010-14. Además, no se debe olvidar confeccionar el anclaje de una vuelta extra en los extremos de aros circulares continuos de pilotes, según indica ACI 318-19.
- Resaltar la importancia de la temperatura del concreto fresco una vez que llega al sitio, puesto que se observó la relación entre temperaturas cercanas y mayores a 30 °C, con calificaciones Pobre/Falla de Crosshole en pilotes.
- Prestar atención a los valores obtenidos en campo de f_c mayores a los de diseño, porque pueden implicar que la estructura se comporte de una manera distinta a la diseñada ante un sismo. Este tema se desarrolla en “Pautas contempladas f_c ” del Análisis de resultados.
- Requerir a los profesionales a cargo de la ejecución de este tipo de obras que generen criterio técnico propio a cerca de las actividades que no ejecutan directamente, con el fin de detectar fallas en los planes y procesos constructivos en cuanto a la normativa mencionada.
- Realizar el análisis del comportamiento de la estructura con el propósito de establecer valores numéricos por cuenta propia y de esta manera identificar discrepancias con lo estipulado por el diseñador. Este análisis establece parámetros numéricos relacionados con el proceso constructivo para la evaluación de los resultados logrados en campo.

Apéndices

- **Apéndice A.** Cálculo de cargas en el puente.
- **Apéndice B.** Cálculo de deflexión por el método Trabajo Virtual.
- **Apéndice C.** Manual Práctico: valores típicos, tolerancias y recomendaciones para la construcción de subestructuras de concreto reforzado en puentes.
- **Apéndice D.** Planos “As Built” Bastión 1.
- **Apéndice E.** Planos “As Built” Bastión 2.

Anexos

- **Anexo A.** Perfil de elevación topográfico final de la tubería.

Referencias

- American Concrete Institute. 2019. **REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL (ACI 318-19)**.
- American Society for Testing and Materials. 2021. **STANDARD TEST METHOD OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CYLINDRICAL CONCRETE SPECIMENS** (ASTM C39/C39M-21).
- American Society for Testing and Materials. 2020. **STANDARD TEST METHOD FOR SLUMP OF HYDRAULIC-CEMENT CONCRETE** (ASTM C143/C143M-20).
- American Society for Testing and Materials. 2017a. **STANDARD TEST METHOD FOR TEMPERATURE OF FRESHLY MIXED HYDRAULIC-CEMENT CONCRETE** (ASTM C1064/C1064M-17).
- American Society for Testing and Materials. 2017b. **STANDARD TEST METHOD FOR INTEGRITY TEST OF CONCRETE DEEP FOUNDATIONS BY ULTRASONIC CROSSHOLE TESTING** (ASTM D6760-16).
- American Society for Testing and Materials. 2016. **STANDARD TEST METHOD FOR LOW STRAIN IMPACT INTEGRITY TESTING OF DEEP FOUNDATIONS** (ASTM D5882-16).
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. 2010. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA 2010 REVISIÓN 2014**. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Cuevas, R. 2019. **CONCRETO CO-3403** [presentación de diapositivas].
- Desde el murete. 2015. **IZADO DE ARMADURAS. PRIMEROS PASOS**. <https://desdeelmurete.com/izado-de-armaduras-primeros-pasos/>
- Desde el murete. 2019. Izado de una armadura de pilotes. **IZADO DE UNA ARMADURA DE PILOTES**. <https://desdeelmurete.com/izado-de-una-armadura-de-pilotes/>
- González Cuevas, O. y Fernández Villegas, F. 2005. **ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO REFORZADO**. México: Editorial Limusa. <https://marodyc.files.wordpress.com/2014/06/aspectos-fundamentales-concreto-reforzado-gonzc3a1lez-cuevas.pdf>
- Ingeniería Técnica de Proyectos ITP S.A. 2021, Julio. **INFORME DE ENSAYO ITP-512-21**.
- Ingeniería Técnica de Proyectos ITP S.A. 2021, Octubre a. **INFORME DE ENSAYO ITP-671-21**.
- Ingeniería Técnica de Proyectos ITP S.A. 2021, Octubre b. **INFORME DE ENSAYO ITP-672-21**.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 2021. **PLANOS CONSTRUCTIVOS: CONTRATACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PUENTE PARA PASO ELEVADO EN RÍO AGUACALIENTE – ACUEDUCTO OROSI LICITACIÓN PÚBLICA INTERNACIONAL N 2013LI-000001-PRI**.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 2014. **PLANOS CONSTRUCTIVOS: CONTRATACIÓN**

**DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PUENTE
PARA PASO ELEVADO EN RÍO
AGUACALIENTE – ACUEDUCTO
OROSI LICITACIÓN PÚBLICA
INTERNACIONAL N 2013LI-000001-PRI**

Peralta, M. 2019. **ANÁLISIS MODAL
ESPECTRAL: TEORÍA Y APLICACIÓN
CON SAP 2000** [pdf].

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
2007. **PRUEBAS AL CONCRETO
FRESCO. SECCIÓN 2.**
<http://www.imcyc.com/ct2007/oct07/PROBLEMAS.pdf>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 2010.
**MANUAL DE ESPECIFICACIONES
GENERALES PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS,
CAMINOS Y PUENTES CR-2010.**

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 2007.
**MANUAL DE INSPECCIÓN DE
PUENTES.**

MYV Soluciones Geotécnicas S.A. 2021, Junio a.
**INFORME DE CONTROL DE CALIDAD
DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA
087-2021-001.**

MYV Soluciones Geotécnicas S.A. 2021, Junio b.
**INFORME DE CONTROL DE CALIDAD
DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA
087-2021-002.**

MYV Soluciones Geotécnicas S.A. 2021, Junio c.
**INFORME DE CONTROL DE CALIDAD
DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA
087-2021-003.**

MYV Soluciones Geotécnicas S.A. 2021, Junio d.
**INFORME DE CONTROL DE CALIDAD
DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA
087-2021-004.**

Navarro, Á. 2017. **FOLLETO APUNTES DEL
CURSO: MECÁNICA DEL SÓLIDO II.**

Navarro, H. 2020. **ACERO DE REFUERZO,
PROPIEDADES Y DETALLADO, SEGÚN
CSCR 2010 Y ACI 318** [presentación de
diapositivas].

Apéndice A: Cálculo de Cargas en el Puente

CARGA TUBERÍA

Diámetro externo: 113 cm; Radio externo: 56,5 cm

Diámetro interno:

$$D_{\text{int}} = 113 - \left(\frac{3}{4} * 2,54\right) = 111,095 \text{ cm}$$

$$r_{\text{int}} = 55,5475 \text{ cm}$$

Área:

$$A = \pi 56,5^2 - \pi 55,5475^2 = 335,2872 \text{ cm}^2 = 0,0335 \text{ m}^2$$

Volumen:

$$V = A * L = 0,0335 \text{ m}^2 * 62,42 \text{ m} = 2,0929 \text{ m}^3$$

Peso tubería:

-Densidad acero: 7850 kg/m³

$$P_{\text{tubería}} = V * \rho = 2,0929 \text{ m}^3 * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 16\,428,9743 \text{ kg}$$

Carga distribuida (la carga puntual anterior se puede expresar como una carga a lo largo de la tubería)

L=62,42 m

$$W_{\text{tubería}} = \frac{P_{\text{tubería}}}{L} = \frac{16\,428,9743 \text{ kg}}{62,42 \text{ m}} = 263,2005 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

CARGA AGUA

Área: (Sección trabajando al 100%, totalmente llena)

$$A = \pi * r_{\text{int}}^2 = 9693,4619 \text{ cm}^2 = 0,9693 \text{ m}^2$$

Volumen:

$$V = A * L = 0,9693 \text{ m}^2 * 62,42 \text{ m} = 60,5066 \text{ m}^3$$

Peso agua:

-Densidad agua: 1000 kg/m³

$$P_{\text{agua}} = V * \rho = 60,5066 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 60\,506,5892 \text{ kg}$$

Carga distribuida (la carga puntual anterior se puede expresar como una carga a lo largo de la tubería)

L=62,42 m

$$W_{\text{agua}} = \frac{P_{\text{agua}}}{L} = \frac{60\,506,5892 \text{ kg}}{62,42 \text{ m}} = 969,3462 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

TOTAL AGUA+TUBERÍA

Peso

$$P_{\text{tubería}} + P_{\text{agua}} = 16\,428,9743 \text{ kg} + 60\,506,5892 \text{ kg} = 76\,935,5635 \text{ kg}$$

Carga distribuida

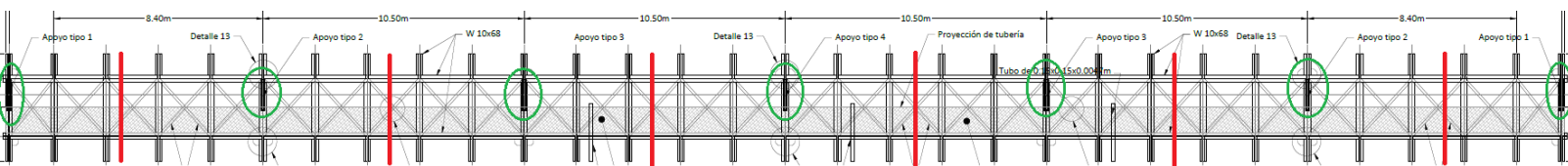
$$\frac{76\,935,5635 \text{ kg}}{62,42 \text{ m}} = 1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$W_{\text{tubería}} + W_{\text{agua}} = 263,2005 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 969,3462 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

TRIBUTACIÓN DE LA CARGA AL PUENTE

Se deben tributar estas cargas calculadas (tubería + agua) a cada una de las 7 sillas, localizadas a cada 5 montantes de la cercha (remarcadas en verde), indicadas en planos como Apoyo tipo 1, Apoyo tipo 2, Apoyo tipo 3, Apoyo tipo 4, Apoyo tipo 3, Apoyo tipo 2 y Apoyo tipo 1. También se marca en rojo el ancho tributario de cada silla y se calculan a continuación.

La siguiente imagen representa el ancho tributario para cada silla en el escenario donde ya han sido removidos los apoyos en los puntos B, C y D.



Carga en cada una de las 7 sillas: (una vez se han demolido los apoyos intermedios B, C y D).

$$(W_{\text{tubería}} + W_{\text{agua}}) \frac{\text{kg}}{\text{m}} * b_{\text{tributario}}$$

Anchos tributarios de cada silla:

$$b_{\text{tributario1}}: (1,81\text{m} + 8,4\text{m}) / 2 = 5,105\text{m}$$

$$b_{\text{tributario2}}: 5,105 \text{ m} + (10,5\text{m} / 2) = 10,355 \text{ m}$$

$$b_{\text{tributario3}}: (10,5\text{m} + 10,5\text{m}) / 2 = 10,5 \text{ m}$$

Cargas en cada silla:

Silletas Tipo 1 (son 2 ubicadas a los extremos)

$$1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 5,105 \text{ m} = 6\,292,1509 \text{ kg}$$

Silletas Tipo 2 (son 2 ubicadas a la par de las Tipo 1)

$$1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 10,355 \text{ m} = 12\,763,0219 \text{ kg}$$

Silletas tipo Tipo 3, Tipo 4 (Son 3 silletas al centro de la cercha)

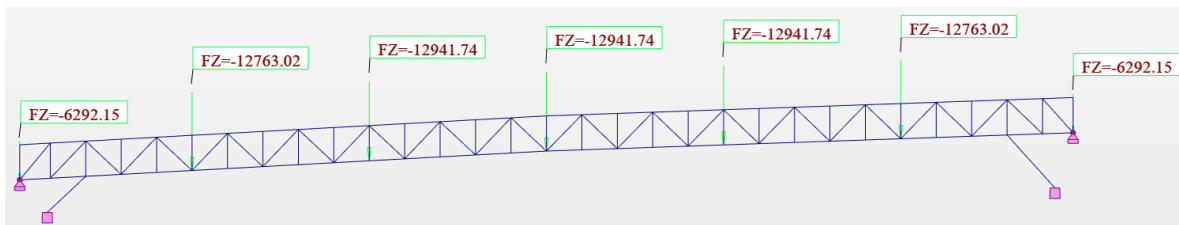
$$1\,232,54676 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 10,50 \text{ m} = 12\,941,7404 \text{ kg}$$

$$2 * 6\,292,1509 + 2 * 12\,763,0219 + 3 * 12\,941,7404 = 76\,935,56 \text{ kg} = \text{Peso Total Tubería en página anterior}$$

Siguiendo el mismo principio, se resumen en las siguientes tablas las cargas que le corresponden a cada silleta dependiendo de los apoyos existentes y los apoyos que se hayan demolido.

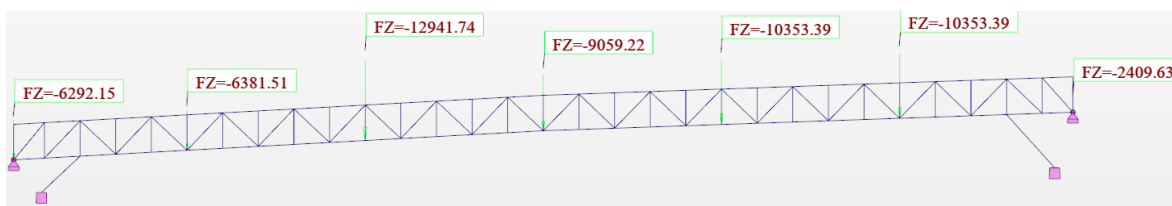
Cargas en cada silleta, apoyos intermedios demolidos.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silleta (kg)	NOTA
Sin apoyos	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	10,355		12763,02	
	3	10,500		12941,74	
	4	10,500		12941,74	
	5	10,500		12941,74	
	6	10,355		12763,02	
	7	5,105		6292,15	



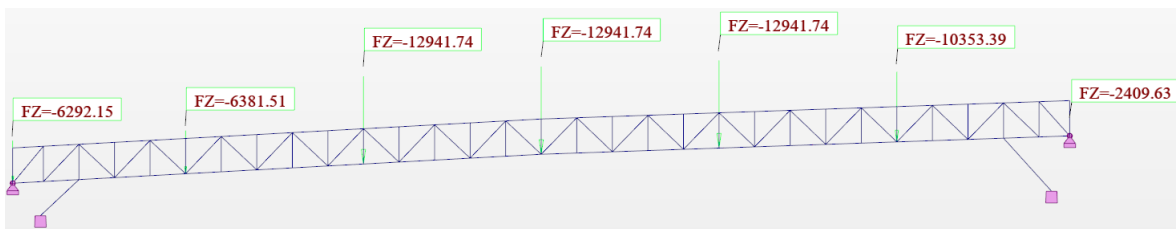
Cargas en cada silleta, sin apoyos demolidos.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	5,1775		6381,51	
B	5,1775	6381,51		No se aplica en el modelo	
	3	10,5		12941,74	
	4	7,350		9059,22	
C	5,250	6470,87		No se aplica en el modelo	
	5	8,400		10353,39	
	6	8,400		10353,39	
D	5,105	6292,15		No se aplica en el modelo	
	7	1,955		2409,63	



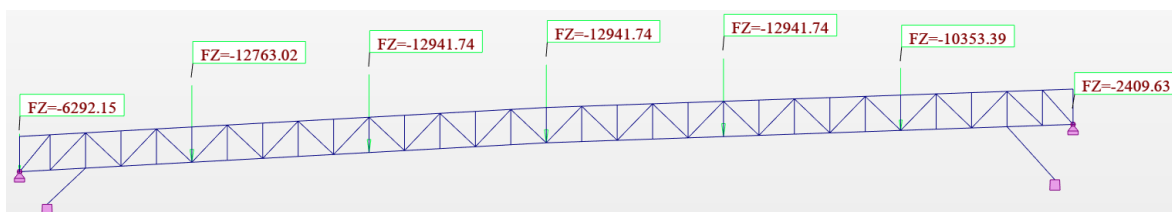
Cargas en cada silleta, apoyo C demolido.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	5,1775		6381,51	
B		5,1775		6381,51	No se aplica en el modelo
	3	10,500		12941,74	
	4	10,500		12941,74	
	5	10,500		12941,74	
	6	8,400		10353,39	
D		5,105	6292,15	No se aplica en el modelo	
	7	1,955		2409,63	



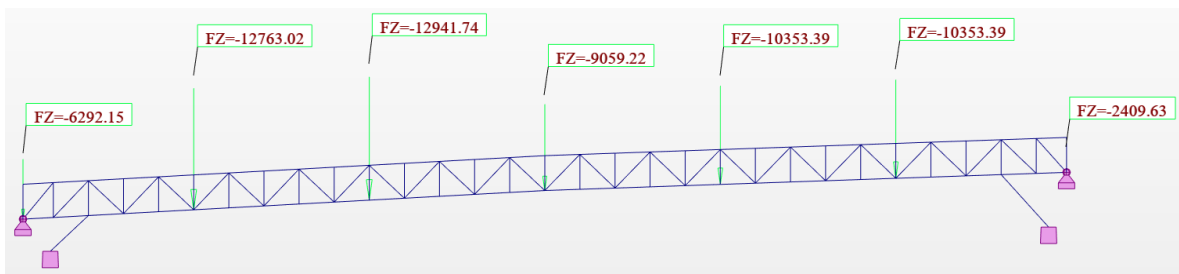
Cargas en cada silleta, apoyos B y C demolidos.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silleta (kg)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	10,355		12763,02	
	3	10,500		12941,74	
	4	10,500		12941,74	
	5	10,500		12941,74	
	6	8,400		10353,39	
D		5,105			6292,15
	7	1,955		2409,63	



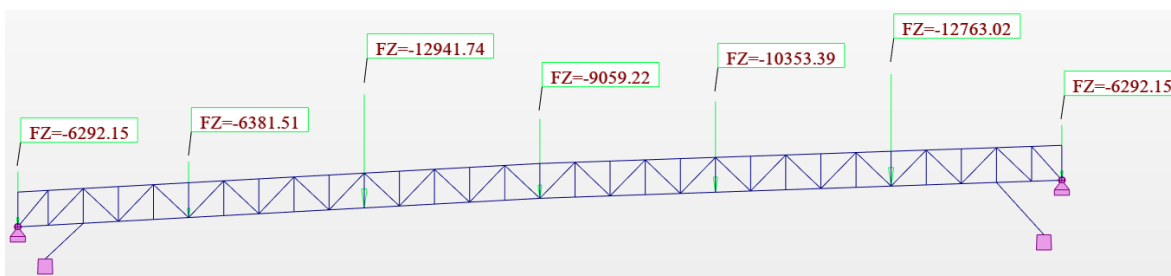
Cargas en cada silleta, apoyo B demolido.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	10,355		12763,02	
	3	10,500		12941,74	
	4	7,350		9059,22	
C		5,250		6470,87	No se aplica en el modelo
	5	8,400		10353,39	
	6	8,400		10353,39	
D		5,105		6292,15	No se aplica en el modelo
	7	1,955		2409,63	



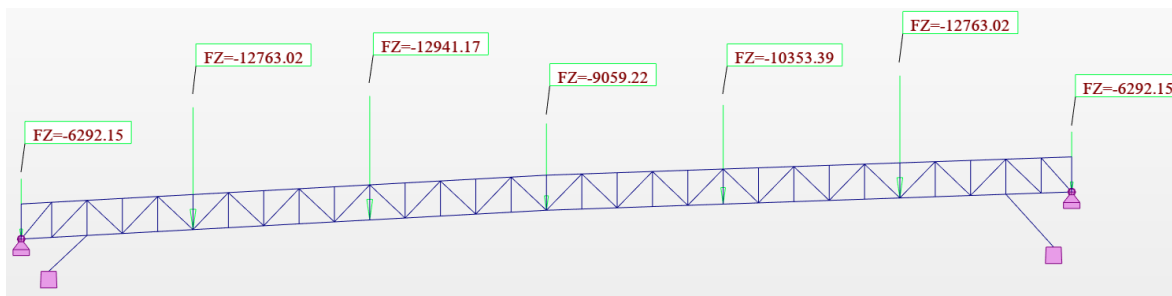
Cargas en cada silleta, apoyo D demolido.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	5,1775		6381,51	
B		5,1775		6381,51	No se aplica en el modelo
	3	10,500		12941,74	
	4	7,350		9059,22	
C		5,250		6470,87	No se aplica en el modelo
	5	8,400		10353,39	
	6	10,355	12763,02		
	7	5,105	6292,15		



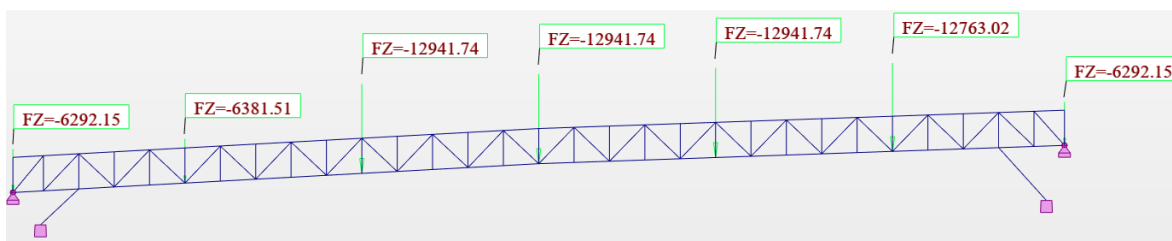
Cargas en cada silleta, apoyos B y D demolidos.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	10,355		12763,02	
	3	10,500		12941,74	
	4	7,350		9059,22	
C		5,250		6470,87	No se aplica en el modelo
	5	8,400		10353,39	
	6	10,355		12763,02	
	7	5,105	6292,15		



Cargas en cada silleta, apoyos C y D demolidos.

Apoyos existentes	Silleta	b tributario (m)	Carga Distribuida Tubería (kg/m)	Carga Puntual en Silletas (m)	NOTA
B	1	5,105	1232,5467	6292,15	
	2	5,1775		6381,51	
		5,1775		6381,51	No se aplica en el modelo
	3	10,500		12941,74	
	4	10,500		12941,74	
	5	10,500		12941,74	
	6	10,355		12763,02	
	7	5,105	6292,15		



PESO PROPIO ESTRUCTURA METÁLICA

Cálculo del peso propio de la estructura metálica.

Perfil	Longitud (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Densidad kg/m ³	Peso kg
W10X77	42,06	0,01465	0,61597	7850	4 835,397
W10X26	305,66	0,00491	1,50069		11 780,410
W6X16	329,64	0,00306	1,00806		7 913,257
W10X68	341,20	0,01284	4,38056		34 387,377
10x10x0,64 cm	27,40	0,00240	0,06565		515,390
W10X45	14,68	0,00858	0,12596		988,814
PESO TOTAL DE LA ESTRUCTURA METÁLICA (kg)					60 420,646

Peso Autodesk Robot: 58 293,53 kg.

Apéndice B: Cálculo de deflexión por el método Trabajo Virtual

Método Trabajo Virtual

Se emplea para calcular deflexiones y rotaciones sin aumentar mucho el procedimiento numérico, además de que puede utilizarse para generar ecuaciones adicionales para resolver sistemas hiperestáticos.

La ecuación general es:

$$(1)\Delta = \sum \frac{FfL}{AE} + \sum \int_0^L \frac{Mm}{EI} dx$$

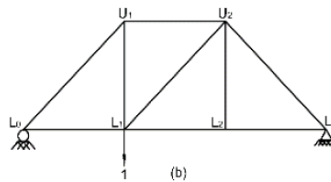
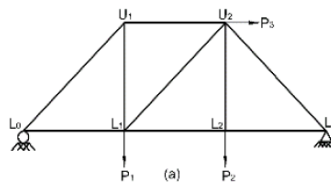
Sin embargo, para su aplicación en armaduras donde sus elementos están sometidos a carga axial por cargas aplicadas en sus nodos:

$$(1)\Delta = \sum \frac{FfL}{AE}$$

- F: cargas axiales debido a la aplicación de fuerzas externas en la armadura.
- f: cargas axiales debido a la fuerza virtual unitaria.
- L: longitud de cada elemento.
- A: área de sección transversal del elemento.
- E: módulo de elasticidad del material de la cercha.

Navarro (2017) indica que si una armadura está sometida a la acción de las cargas P y se desea calcular el desplazamiento vertical en el nodo $L1$. Se supone una carga unitaria vertical que actúa en el nodo $L1$, como se muestra en la figura (b).

La deflexión debida a las cargas P , se puede calcular mediante el principio del Trabajo Virtual, con la ecuación para armaduras, donde F son las cargas axiales en cada uno de los elementos debido a las cargas P , y f son las cargas axiales generadas por la carga unitaria 1.



Solución

Para la aplicación del método energético de Trabajo Virtual se hizo la simplificación del modelo tridimensional del puente a una sola cercha 2D. Para ello se contemplaron los perfiles W10X26, W10X77 y W10X68, dejando por fuera los arriostres laterales e inferiores del modelo 3D, y se le tributaron las cargas como se expone a continuación.

Aplicación de cargas distribuidas a nodos

Peso Propio

$$PP = 18289,93 \text{ kg}$$

$$PP_{\text{Distribuido}} = \frac{18\,289,93 \text{ kg}}{62,42 \text{ m}} = 292,967 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

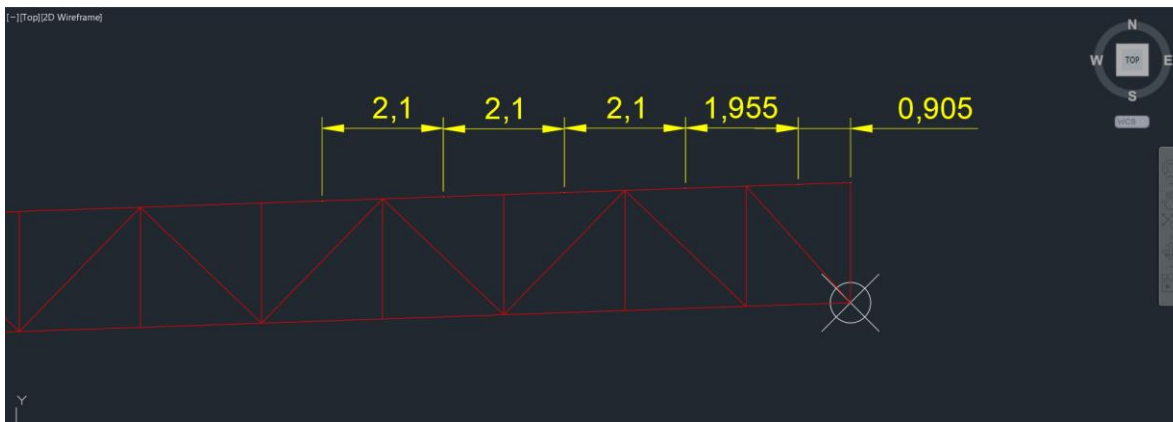
Peso Accesorios

$$PA = 25 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Suma de ambos

$$PP_{\text{Distribuido}} + PA = 317,767 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Este último debe aplicarse a cada uno de los nodos, para tributar esta carga distribuida se utilizan los anchos tributarios en cada uno de los montantes (elementos verticales de la cercha).



$$b_{\text{trib1}} = \frac{1,81 \text{ m}}{2} = 0,905 \text{ m}$$

$$b_{\text{trib2}} = \frac{1,81 \text{ m}}{2} + \frac{2,1 \text{ m}}{2} = 1,955 \text{ m}$$

$$b_{\text{trib3}} = \frac{2,1}{2} + \frac{2,1 \text{ m}}{2} = 2,1 \text{ m}$$

Nodos 1 y 31

$$\text{Peso Distribuido} \cdot b_{\text{trib1}} = 317,767 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 0,905\text{m} = \mathbf{287,579 \text{ kg}}$$

Nodos 2 y 30

$$\text{Peso Distribuido} \cdot b_{\text{trib2}} = 317,767 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 1,955\text{m} = \mathbf{621,234 \text{ kg}}$$

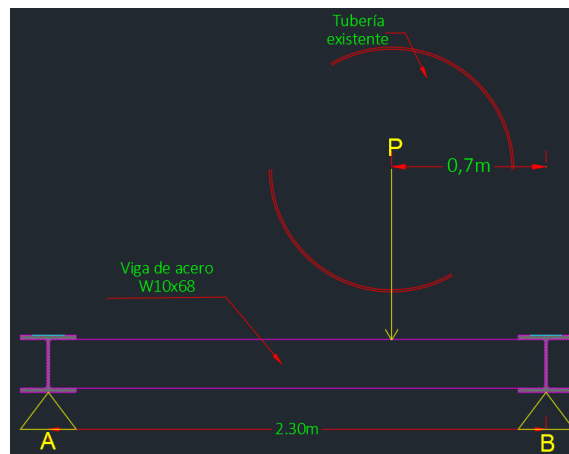
Nodos 3 al 29

$$\text{Peso Distribuido} \cdot b_{\text{trib3}} = 317,767 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 2,1\text{m} = \mathbf{667,3107 \text{ kg}}$$

Cargas por tubería + agua

Estas cargas fueron calculadas anteriormente en el Apéndice A, sin embargo, como no se aplica en el centro de la sección transversal de la estructura metálica, esta carga tiene un mayor efecto sobre una cercha que en la otra.

Por tal motivo, se realiza la siguiente distribución analizando el elemento inferior sobre el cual se aplica la carga, como una viga simplemente apoyada:



Se realiza el cálculo de reacciones, comenzando con suma de momentos en A igual a cero para conocer la reacción en B en dirección Y+:

$$\sum M_A = 0 \text{ (antihorario positivo)}$$

$$-1.6P + 2.3B_Y = 0$$

$$-1.6P + 2.3B_Y = 0$$

$$B_Y = \frac{1,6P}{2,3}$$

Después para conocer la reacción en A en dirección Y+:

$$\sum F_Y = 0 \text{ (hacia arriba positivo)}$$

$$A_Y - P + \frac{1,6P}{2,3} = 0$$

$$A_Y = P - \left(\frac{1,6P}{2,3}\right)$$

Al dar valores a P, se sabe que $B_Y > A_Y$. Por lo que B es la cercha crítica por la excentricidad de la carga.

Recordando del Apéndice A:

Silletas Tipo 1 (son 2 ubicadas a los extremos), en montantes 1 y 31:

$$1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 5,105 \text{ m} = 6\,292,1509 \text{ kg}$$

Silletas Tipo 2 (son 2 ubicadas a la par de las Tipo 1), en montantes 6 y 26:

$$1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 10,355 \text{ m} = 12\,763,0219 \text{ kg}$$

Silletas tipo Tipo 3, Tipo 4 (Son 3 silletas al centro de la cercha), en montantes 11, 16 y 21.

$$1\,232,5467 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 10,50 \text{ m} = 12\,941,7404 \text{ kg}$$

Por lo tanto, las carga que actúan en los nodos:

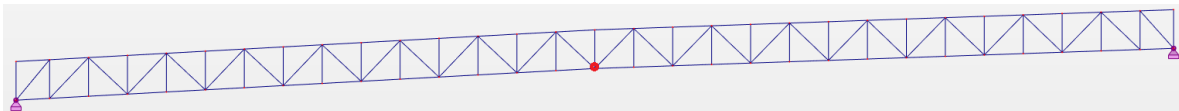
$$P_{1,3} = \frac{1,6 \cdot 6\,292,15 \text{ kg}}{3,2} = 4\,377,15 \text{ kg}$$

$$P_{6,26} = \frac{1,6 \cdot 12\,763,0219 \text{ kg}}{3,2} = 8\,878,62 \text{ kg}$$

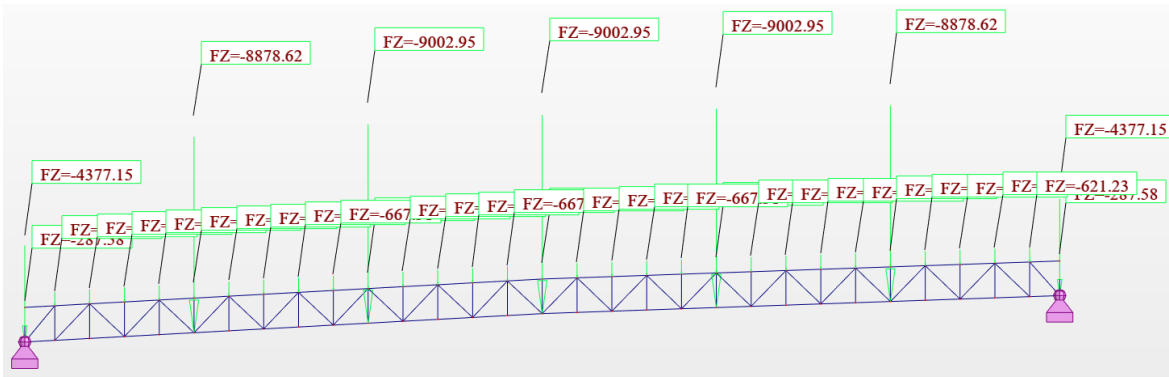
$$P_{6,26} = \frac{1,6 \cdot 12\,941,7404 \text{ kg}}{3,2} = 9\,002,95 \text{ kg}$$

Seguidamente se muestra el modelo 2D desarrollado, con el nodo en estudio marcado en rojo.

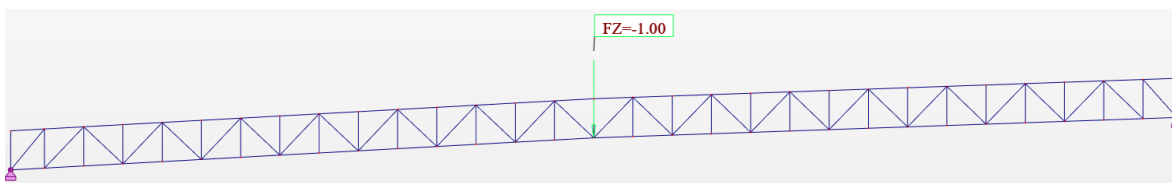
NOTA: como el peso propio fue contemplado y aplicado al modelo, se desactivó la opción de peso propio en Autodesk Robot.



Nodo central en estudio.



Cargas que actúan sobre la armadura.



Carga virtual unitaria (1) kgf.

Seguidamente, se presenta el procedimiento de aplicación de Trabajo Virtual para encontrar la deflexión de la cercha en el nodo indicado.

Aplicación del Método de Trabajo Virtual.

Barra	Sección	L (m)	F (kgf)	f (kgf)	F · f · L
1	W10X26	2,08	304,61	0	0,0000
2	W10X26	2,08	-26587,14	-0,42	23226,5255
3	W10X26	2,08	-2820,71	-0,06	352,0246
4	W10X26	2,08	-1521,58	-0,05	158,2443
5	W10X26	2,08	-3049,85	-0,06	380,6213
6	W10X26	2,08	-3118,07	-0,06	389,1351
7	W10X26	2,08	-3214,19	-0,06	401,1309
8	W10X26	2,08	-2500,75	-0,06	312,0936
9	W10X26	2,08	-2765,06	-0,06	345,0795
10	W10X26	2,08	-2277	-0,06	284,1696
11	W10X26	2,08	-10093,76	-0,05	1049,7510
12	W10X26	2,08	-2396,11	-0,06	299,0345
13	W10X26	2,08	-2490,54	-0,05	259,0162
14	W10X26	2,08	-2513,03	-0,05	261,3551
15	W10X26	2,08	-3004,28	-0,08	499,9122
16	W10X26	2,08	-7489,5	-0,28	4361,8848
17	W10X26	2,08	-3118,2	-0,1	648,5856

18	W10X26	2,08	-2701,86	-0,08	449,5895
19	W10X26	2,08	-2700,36	-0,07	393,1724
20	W10X26	2,08	-2697,05	-0,08	448,7891
21	W10X26	2,08	-10561,69	-0,07	1537,7821
22	W10X26	2,08	-2921,98	-0,08	486,2175
23	W10X26	2,08	-3490,49	-0,08	580,8175
24	W10X26	2,08	-3269,75	-0,08	544,0864
25	W10X26	2,08	-4060,55	-0,08	675,6755
26	W10X26	2,08	-4139,63	-0,08	688,8344
27	W10X26	2,08	-4249,51	-0,08	707,1185
28	W10X26	2,08	-2762,42	-0,07	402,2084
29	W10X26	2,08	-3852,6	-0,08	641,0726
30	W10X26	2,08	-26994,99	-0,43	24144,3191
31	W10X26	2,08	155,3	-0,01	-3,2302
32	W10X26	2,83	39447,56	0,61	68098,3228
33	W10X26	3,04	42388,82	0,68	87626,1687
34	W10X26	2,88	-34581,4	-0,53	52785,0490
35	W10X26	3,04	43392,35	0,73	96296,3031
36	W10X26	2,88	-31269,76	-0,52	46829,5926
37	W10X26	3,04	30371,06	0,73	67399,4564
38	W10X26	2,88	-18324,07	-0,52	27442,1272
39	W10X26	3,04	27772,65	0,73	61633,0649
40	W10X26	2,88	-16837,61	-0,52	25216,0047
41	W10X26	3,04	24538,22	0,73	54455,2178
42	W10X26	2,88	-4546,25	-0,53	6939,3960
43	W10X26	3,04	11179,24	0,72	24469,1205
44	W10X26	2,88	-1464,42	-0,53	2235,2907
45	W10X26	3,04	9555,76	0,72	20915,6475
46	W10X26	2,88	584,64	-0,45	-757,6934
47	W10X26	3,01	740,93	-0,45	-1003,5897
48	W10X26	2,9	9326,21	0,72	19473,1265
49	W10X26	3,01	-1234,37	-0,53	1969,1905
50	W10X26	2,9	10987,03	0,71	22622,2948
51	W10X26	3,01	-4233,75	-0,52	6626,6655
52	W10X26	2,9	24204,37	0,73	51240,6513
53	W10X26	3,01	-16610,86	-0,51	25499,3312
54	W10X26	2,9	27522,67	0,73	58265,4924
55	W10X26	3,01	-18044,44	-0,51	27700,0198
56	W10X26	2,9	30226,74	0,73	63990,0086
57	W10X26	3,01	-31112,63	-0,51	47760,9983
58	W10X26	2,9	43132,2	0,73	91310,8674

59	W10X26	3,01	-34432,71	-0,53	54930,5023
60	W10X26	2,9	41503,12	0,66	79436,9717
61	W10X26	2,71	37821,97	0,59	60473,5478
$\Sigma(F \cdot f \cdot L)$ W10X26					1316804,1634
62	W10X77	2,1	228690,71	4,99	2396449,9501
63	W10X77	2,1	228653,08	5,01	2405659,0547
64	W10X77	2,1	237818,62	5,92	2956561,0838
65	W10X77	2,1	237777,05	5,93	2961037,6037
66	W10X77	2,1	244232,71	6,78	3477385,3250
67	W10X77	2,1	243860,33	6,77	3466962,3116
68	W10X77	2,1	237618,62	5,92	2954074,6838
69	W10X77	2,1	237358,76	5,9	2940875,0364
70	W10X77	2,1	228466,07	4,99	2394095,9475
71	W10X77	2,1	228204,37	4,98	2386561,3015
$\Sigma(F \cdot f \cdot L)$ W10X77					28339662,2981
72	W10X68	2,1	27516,6	0,43	24847,4898
73	W10X68	2,1	174584,67	3,15	1154877,5921
74	W10X68	2,1	174986,15	3,16	1161208,0914
75	W10X68	2,1	207392,27	4,07	1772581,7317
76	W10X68	2,1	207803,95	4,08	1780464,2436
77	W10X68	2,1	207398,72	4,07	1772636,8598
78	W10X68	2,1	206682,76	4,05	1757836,8738
79	W10X68	2,1	174579,92	3,15	1154846,1708
80	W10X68	2,1	137802,15	2,21	639539,7782
81	W10X68	2,1	83795,49	1,31	230521,3930
82	W10X68	2,1	82714,89	1,29	224074,6370
83	W10X68	2,1	27218,9	0,42	24007,0698
84	W10X68	1,81	927,73	0,01	16,7919
85	W10X68	2,1	127929,68	3	805956,9840
86	W10X68	2,1	126983,21	2,98	794660,9282
87	W10X68	2,1	70257,09	2,07	305407,5702
88	W10X68	2,1	69454,91	2,05	299003,3876
89	W10X68	2,1	24413,49	1,14	58445,8951
90	W10X68	2,1	24004,32	1,13	56962,2514
91	W10X68	2,1	-9497,92	0,22	-4388,0390
92	W10X68	2,1	-9894,72	0,21	-4363,5715
93	W10X68	2,1	-40017,21	-0,7	58825,2987
94	W10X68	2,1	-40305,82	-0,71	60095,9776
95	W10X68	2,1	-51620,31	-1,61	174528,2681
96	W10X68	2,1	-51647,06	-1,63	176787,8864
97	W10X68	2,1	-59635,18	-2,54	318094,0501

98	W10X68	2,1	-59578,59	-2,55	319043,3495
99	W10X68	2,1	-59749,15	-2,57	322466,1626
100	W10X68	2,1	-59530,65	-2,54	317536,4871
101	W10X68	2,1	-51844,8	-1,64	178553,4912
102	W10X68	2,1	-51583,06	-1,62	175485,5701
103	W10X68	2,1	-40563,82	-0,72	61332,4958
104	W10X68	2,1	-40181,43	-0,7	59066,7021
105	W10X68	2,1	-10419,13	0,2	-4376,0346
106	W10X68	2,1	-9743,05	0,22	-4501,2891
107	W10X68	2,1	23387,46	1,12	55007,3059
108	W10X68	2,1	24115,68	1,14	57732,9379
109	W10X68	2,1	68557,55	2,04	293700,5442
110	W10X68	2,1	69676,77	2,06	301421,7070
111	W10X68	2,1	126059,43	2,97	786232,6649
112	W10X68	2,1	127322,86	2,99	799460,2379
113	W10X68	1,81	158236,86	3,48	996702,3338
114	W10X68	1,81	1004,77	0,01	18,1863
115	W10X68	2,1	83587,41	1,3	228193,6293
116	W10X68	2,1	84416,16	1,32	234001,5955
117	W10X68	2,1	138680,59	2,22	646528,9106
118	W10X68	2,1	139232,12	2,24	654947,8925
119	W10X68	1,81	158494,92	3,48	998327,8021
120	W10X68	2,1	173855,7	3,13	1142753,5161
121	W10X68	2,1	138760,29	2,23	649814,4381
$\Sigma(F \cdot f \cdot L)$ W10X68					24066926,2464

Recordando

$$(1 \text{ kgf}) \cdot \Delta = \Sigma \frac{FfL}{AE}$$

Perfil	Área (m ²)	E (kgf/m ²)	$\Sigma(F \cdot f \cdot L)$	$\Sigma(F \cdot f \cdot L)/AE$
W10X26	0,00491	21000000000	1316804,1634	0,0128
W10X77	0,01465		28339662,2981	0,0921
W10X68	0,01284		24066926,2464	0,0893
DEFLEXIÓN NODO (m)				0,1942

$$(1 \text{ kgf}) \cdot \Delta = (0,0128 + 0,0921 + 0,0893) \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\Delta = 0,1942 \text{ m} = 19,42 \text{ cm}$$

MANUAL PRÁCTICO



VALORES TÍPICOS, TOLERANCIAS Y
RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
SUBESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EN
PUENTES

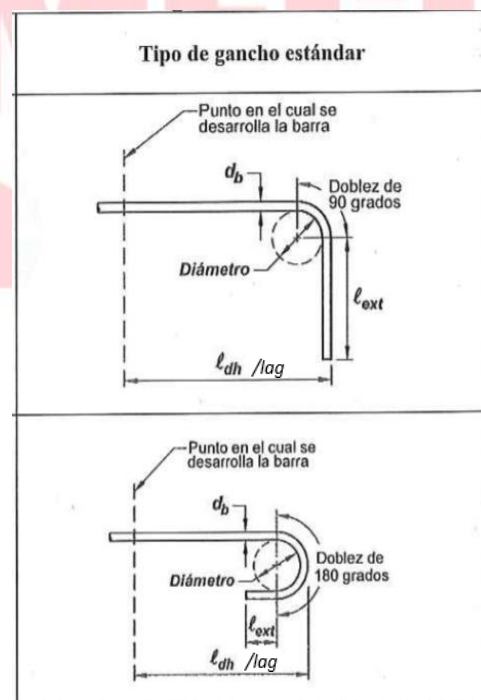
OSCAR EDUARDO LIZANO GUTIÉRREZ
Ingeniería en Construcción
Tecnológico de Costa Rica
Noviembre, 2021

VALORES TÍPICOS

Recubrimiento del concreto

Norma/Código/Documento	Valor (cm)	Sección de la Norma
ACI 318-19 (Pilotes)	7,5	Tabla 20.5.1.3.1
ACI 318-19 (Placas fundación)	7,5	Tabla 20.5.1.3.2
ACI 318-19 (Elementos Expuestos)	5	Tabla 20.5.1.3.3
CR-2010 (General)	5	Sección 554.08

Armado de acero de refuerzo



NOTA: Para cálculo en ACI 318-19 de l_{dh} , l_{st} y l_{sc} se utilizó $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

ACI 318-19: espirales y acero circular continuo.

ACI 318-19 25.7.3 Espirales:

Las espirales deben consistir en barras o alambres continuos con espaciamiento uniforme que cumpla con

- Al menos el mayor de 25 mm y $4/3$ dagg.
- No puede ser mayor que 75 mm.

NOTA: dagg es el tamaño nominal máximo del agregado grueso (mm).

Traslape entre espirales es de 48 diámetros de barra, según Tabla 25.7.3.6.

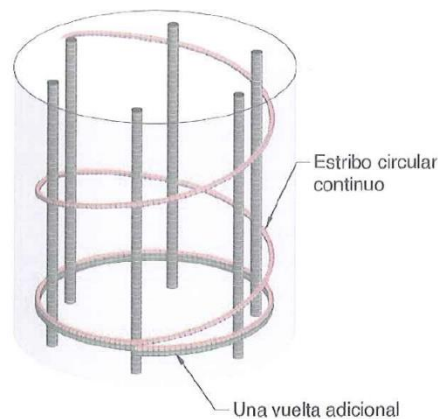
Anclaje de espiral consiste en una y media vuelta adicional en cada extremo.



Cuando el espaciamiento en espirales es mayor a 75 mm se considera como Aro circular continuo.

ACI 318-19 R25.7.2.3 (comentario) Aros circulares continuos:

El anclaje de los extremos de las barras o alambres doblados de manera continua debe consistir en un gancho estándar de una vuelta adicional del estribo



ACI 318-19 (25.3, 25.4 y 25.5). Acero longitudinal y aros:

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Extensión recta "lext" después de doblez (cm)		
		lext (90)	lext (135)	lext (180)
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	15,24	N.A	5,08 (6,5)
	No. 5	19,05	N.A	6,35 (6,5)
	No. 6	22,86	N.A	7,62
	No. 8	30,48	N.A	10,16
	No. 9	34,29	N.A	11,43
Aros y aros circulares individuales	No. 3	5,72 (7,5)	5,72 (7,5)	3,81 (6,5)
	No. 4	7,62	7,62	5,08 (6,5)
	No. 5	9,525	9,525	6,35 (6,5)

NOTA: Medidas mínimas de lext 6,5 cm y 7,5 cm.

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Longitud de gancho estándar "ldh"
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	13,46
	No. 5	18,8
	No. 6	24,72
	No. 8	38,06
	No. 9	45,41
Aros	-	N.A
Espiral	-	1 y 1/2 vueltas extras en los extremos del elemento
Aro Circular continuo	-	1 vuelta extra en los extremos del elemento

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Traslape "cm"		
		Ist superior (tracción)	Ist inferior (tracción)	Isc (compresión)
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	197,33	151,79	378,71
	No. 5	246,67	189,74	473,39
	No. 6	296	227,69	568,07
	No. 8	394,66	303,59	757,43
	No. 9	444	341,54	852,11
Aros	No. 3	N.A		
Aro circular individual	-	15		
Espiral	-	48 diámetros de barra		

NOTA: Medidas de Ist y Isc mínimas: 30 cm

Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014 (CSCR-2010 (14)). Acero longitudinal y aros:

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Extensión recta "l _{ext} " después de dobléz (cm)		
		l _{ext} (90)	l _{ext} (135)	l _{ext} (180)
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	15,24	N.A	5,08 (6,5)
	No. 5	19,05	N.A	6,35 (6,5)
	No. 6	22,86	N.A	7,62
	No. 8	30,48	N.A	10,16
	No. 9	34,29	N.A	11,43
Aros	No. 3	5,72 (7,5)	5,72 (7,5)	3,81 (6,5)
	No. 4	7,62	7,62	5,08 (6,5)
	No. 5	9,525	9,525	6,35 (6,5)

NOTA: Medidas mínimas de l_{ext} 6,5 cm y 7,5 cm.

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Longitud de gancho estándar "l _{ag} " (#3 - #11) El mayor de:		
		8 db	15 cm	f _y db/16v _f 'c
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	13,46	15	19,92
	No. 5	18,8		24,9
	No. 6	24,72		29,89
	No. 8	38,06		40
	No. 9	45,41		44,83
Aros	-	N.A		

Elemento de refuerzo	Diámetro de barra	Traslape "l _{ar} " (#3 - #11) (cm)	
		l _{ar} superior (d > 30 cm)	l _{ar} inferior
Barras corrugadas longitudinales	No. 4	69,72	49,8
	No. 5	87,15	62,25
	No. 6	104,615	74,725
	No. 8	140	100
	No. 9	158,935	113,525
Aros	-	N.A	

Calidad de los materiales:

Resistencia a la compresión del concreto

Norma/Código/Documento	Frecuencia de muestreo	Cilindros por muestra
ACI 318-19	Muestras 1 vez al día o muestras cada 110 m ³	2 cilindros (28 días)
CR-2010	muestra 1 vez al día o muestra cada 25 m ³	4 cilindros

Norma/Código/Documento	Moldeo	Ensayos f'c
ACI 318-19	ASTM C31	ASTM C39
CR-2010	AASHTO T23	AASHTO T22

Temperatura de concreto fresco

Norma/Código/Documento	Frecuencia de muestreo	Temperaturas permitidas (°C)	Norma
ACI 318-19 (ACI 301)	---	Máx 35	-
CR-2010	Primera batida	10-30	Termómetro

Revenimiento del concreto fresco

- CR-2010 Subsección 552.03 (Tabla 552-1): Para el concreto estructural Clase B, indica un revenimiento de 5 a 10 cm.
- CR-2010 Subsección 565.07: Indica que para pilotes preexcavados colados en sitio se permite un revenimiento de $17,5 \pm 2,5$ cm (concreto estructural Clase A).

Norma/Código/Documento	Frecuencia de muestreo	Valor (cm)	Norma
CR-2010 (Concreto clase B)	1 muestra por carga (AASHTO T141)	5-10	AASHTO T119
CR-2010 (Pilotes sin fluidos)	1 muestra por carga (AASHTO T141)	Pilotes: $17,5 \pm 2,5$	AASHTO T119

TOLERANCIAS NORMADAS

Recubrimiento del concreto

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(a) Tolerancias para d y el recubrimiento especificado:

NOTA: “ d ” es la distancia de la fibra extrema en compresión hasta el centroide acero de refuerzo longitudinal en tensión.

d (mm)	Tolerancia en el recubrimiento especificado (mm)	
≤ 200	Menor de	-10
		-1/3 del recubrimiento especificado
> 200	Menor de	-13
		-1/3 del recubrimiento especificado
La tolerancia para el recubrimiento de la parte inferior del miembro es -6mm.		

Armado de acero de refuerzo

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(a) Tolerancias para d y el recubrimiento especificado:

d (mm)	Tolerancia en d (mm)
≤ 200	± 10
> 200	± 13

ACI 318-19 26.6.2.1(c) Tolerancia para el espaciamiento de estribos cerrados de confinamiento en miembros de sistemas sísmicos intermedios y especiales:

- El menor entre: +40 mm y +1,5 db de la menor barra longitudinal.
- El menor de: -25 mm por cada 30 cm de la menor dimensión del miembro y -75 mm.

ACI 318-19 Tabla 26.6.2.1(b) Tolerancias para la ubicación longitudinal de los dobleces y extremos del refuerzo:

Ubicación longitudinal	Tolerancia (mm)
Extremos discontinuos de ménsulas y cartelas	± 13
Extremos discontinuos de otros miembros	± 25
Otras ubicaciones	± 50

Construcción de elementos en concreto

ACI 117-10 4.5 desviación para dimensiones de sección transversal.

Dimensión transversal t (in)	Tolerancia (in)
t < 12	+ 3/8 -1/4
12 < t < 36	+1/2 -3/8
t > 36	+1 -3/4

ACI 117-10 11. Puentes colados en sitio

ACI 117 11.2 Desviación horizontal

Desviación horizontal	Tolerancia (in)
Alineación central	± 1/2
Vigas primarias y largueros	± 1/8

ACI 117 11.3 Desviación vertical: Superficie superior de un paso elevado ±1 in. Espacio libre desde superficie superior hasta el fondo del elemento estructural más bajo +1 in y -0 in.

ACI 117 11.4 Largo, ancho o profundidad de elementos.

Elemento especificado	Tolerancia (in)
Espesor de losa de puente	± 1/4
Columnas, vigas, pilas y muros	+1/2 -1/4

ACI 117 11.6 Recubrimiento de la superficie de rodamiento

Elemento especificado	Tolerancia (in)
Recubrimiento	+1 -0

ACI 117 11.7 Desviación horizontal de apoyos

Elemento especificado	Tolerancia (in)
Respecto a la línea de centro	± 1

CR-2010 554.08 Colocación y fijación:

Se espaciarán varillas paralelas con una precisión de 38 mm del lugar requerido. El promedio de cualquiera de los dos espacios adyacentes, no debe exceder el espacio requerido de 38 mm.

CSCR-2010 (14) Tolerancia en ubicación de traslapes:

- En elementos de concreto reforzado el traslapo del refuerzo longitudinal se debe hacer de forma alternada.
- La distancia entre traslapes alternos debe ser mayor que 30 diámetros de barra de refuerzo.
- En ningún caso se puede traslapar más del 50% del refuerzo en tracción en una sección.
- La longitud de empalme por traslapo de una barra sometida a tracción no será menor que 30 cm.

Calidad de los materiales: resistencia a la compresión del concreto

ACI 318-19, sección 26.12.3:

El promedio de las resistencias de tres muestras consecutivas debe ser igual o mayor a la resistencia especificada. (La resistencia de una muestra debe entenderse como el promedio de las resistencias de dos cilindros de la misma mezcla de concreto).

- Si $f'c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$: Ninguna muestra individual puede tener una resistencia menor que la resistencia especificada menos 35 kg/cm^2
- Si $f'c > 350 \text{ kg/cm}^2$: Ninguna muestra individual puede tener una resistencia menor que $0,10 f'c$.

Probabilidad que ensayos de resistencia que no cumplan con estos criterios: 1/100. (ACI 214R).

CR-2010 Subsección 552.03 nota (v):

Hasta obtener la resistencia a los 28 días del concreto, el diseño de mezcla en cuestión puede ser aprobado si los resultados de resistencia a la compresión a los 7 días son iguales o mayores al 85% de la resistencia requerida a los 28 días.

RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

SEGÚN NORMAS

Construcción de Pilotes

CR-2010 565.04 y 565.05: cuando el contrato así lo requiera, se construyen pilotes preexcavados de prueba de acuerdo con los requisitos mencionados en estas subsecciones.

CR-2010 565.05 estipula que el Plan de Pilotaje debe incluir un registro que contenga:

- Descripción y elevación aproximada del límite superior e inferior de cada estrato de suelo o material rocoso encontrado y la fecha y hora en que fue encontrado el suelo o material rocoso.
- Agua subterránea encontrada.
- Equipo utilizado, tiempo requerido para perforar un pilote, los cambios de las barrenas, averías y otras dificultades encontradas.
- Observaciones.

CR-2010 565.05 (a) que indica que durante 20 horas después de haber colado un pilote, no se deben excavar pilotes adicionales, permitir cargas de llantas excesivas o permitir vibraciones excesivas a una distancia de:

- 5 m
- 3 veces el diámetro del pilote

Se escoge el mayor valor entre ambas distancias.

Los requisitos para efectuar la perforación de pilotes por el método seco son:

- Se acumula menos de 300 mm de agua en el fondo del pozo cuando no se permite bombeo.
- Las paredes y el fondo de la perforación permanecen estables, sin socavarse, derrumbarse o sufrir hinchamiento durante un período de 4 horas después de la finalización de la excavación.
- El material suelto y el agua pueden ser extraídos satisfactoriamente antes de la inspección y de colocación del concreto.

CR-2010 565.06 Acero de refuerzo para pilotes preexcavados y colocación de los tubos de acceso para la prueba de registros sínicos cruzados:

Se debe atar firmemente los espaciadores del concreto y otros dispositivos de espaciamiento en las quintas partes, a lo largo del perímetro de la armadura y se debe espaciar en intervalos que no excedan los 3 metros, a lo largo de la longitud de la armadura.

La tolerancia presente en esta subsección indica que colocación final de la armadura de los pilotes es de máximo 150 mm por encima y a no más de 75 mm por debajo de la posición requerida.

CR-2010 565.07 hace la indicación de que a la hora de colar pilotes con tolva se debe mantener el tubo de descarga sumergido por lo menos 1,5 m bajo la superficie de concreto fluido.

La subsección menciona que la altura máxima de caída libre del concreto es de 8 metros, medida desde el fondo del conducto (Tubería Tremie en colado de pilotes).

También estipula la consolidación de los 3 metros superiores del concreto del pilote con equipo de vibración.

El Manual CR-2010 en la subsección 565.07 indica que se deben llenar con agua los tubos de Crosshole después del izado, una hora después del colado del pilote. En cambio, MYV Soluciones Geotécnicas (empresa que ejecuta ensayos de Crosshole y P.I.T.) indicó en las recomendaciones de informes que esto es una mala práctica.

MYV asegura que los tubos se deben llenar antes de colarse el concreto en el pilote, para evitar deformaciones y evitar que el calor de hidratación del concreto cause desadherencia entre el tubo y el concreto. En la construcción de pilotes, se ejecutó el llenado de los tubos con agua posterior al colado.

Construcción de Bastiones

CR-2010 552.11 asegura que no se debe dejar caer concreto sin confinamiento a más de dos metros. (El confinamiento se refiere al uso de un tubo ajustado como en el colado de pilotes).

CR-2010 554.08 indica que se espaciarán las varillas paralelas con una precisión de 38 mm del lugar requerido.

ACI 318-19 R26.5.6.1(b) (comentario) Juntas de construcción, contracción y dilatación: menciona que donde se requiera de transferencia de fuerzas, puede usarse llaves de cortante o cortante por fricción en una interfaz de unión de acuerdo con 22.9. Este último artículo indica “esta sección aplica donde sea apropiado considerar transferencia de cortante a través de cualquier plano dado, como puede ser una fisura existente, una interfaz entre materiales diferentes, o una interfaz entre dos concretos construidos en tiempo diferentes”.

ACI 26.5.5.1(c) estipula que la preparación de superficie debe incluir una superficie del concreto endurecido intencionalmente rugosa, cuando se cola sobre concreto previamente endurecido.

CR-2010 subsección 552.12 indica que estas juntas de construcción estas deben ser limpiadas y saturadas antes de colar el concreto nuevo, y que el acero de refuerzo debe pasar a través a las juntas de construcción.

ACI R26.7.1(i) (comentario) Anclaje al concreto: asegura que es necesario mantener el control de calidad en sitio en anclajes adheridos, debido a la sensibilidad de la resistencia de adherencia a la instalación. Los documentos de construcción deben contener mínimo los siguientes parámetros:

- Ambiente aceptable para la instalación del anclaje (concreto seco o saturado; intervalo de temperatura del concreto).
- Métodos de taladrado aceptables.
- Procedimientos requeridos de limpieza del hueco.
- Tipo de anclaje e intervalo de tamaños (barra roscada o barra de refuerzo).



RECOMENDACIÓN CONSTRUCTIVA

IZAJE DE ARMADURA DE PILOTES

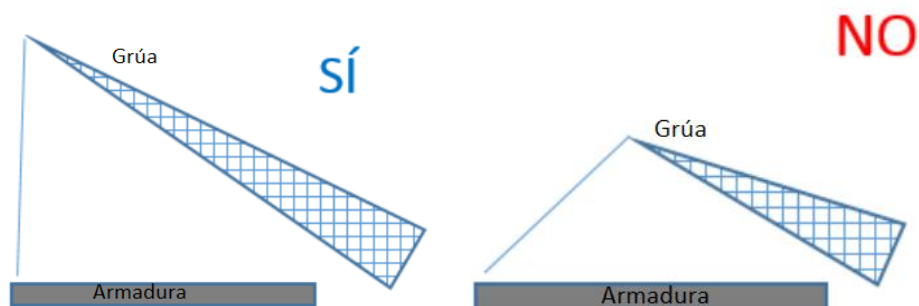
Se recomienda incluir un procedimiento de izaje de armaduras de pilotes en el plan de pilotaje. Esto para evitar que la armadura se dañe por excesivos esfuerzos de flexión, así como los tubos de Crosshole.

En la medida de lo posible se recomienda el uso de grúas auxiliares, o a modo general una grúa que posea dos cabrestantes (cilindros giratorios), uno principal (que tiene cable con gancho) y otro auxiliar, los cuales se puedan girar independientemente y enrollar su respectivo cable.

Además de la grúa y de los cabrestantes principal y auxiliar, hay elementos que se deberán tener a disposición como cadenas y pulpos instalados en cualquiera de los dos cabestrantes y así levantar la armadura desde más de dos puntos cuando se requiera.

Los pasos estándar por seguir son

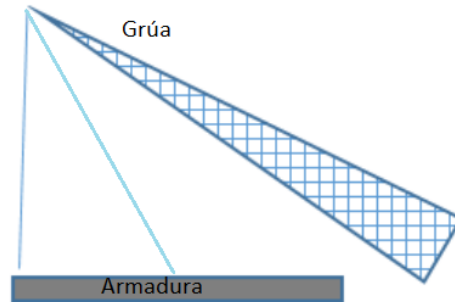
- La armadura se encuentra horizontalmente en el suelo.
- Se posiciona la grúa en el lado opuesto a la cabeza de la armadura y se engancha el gancho del cabestrante principal a la cabeza de la armadura.
- Se posiciona el brazo de modo que el plumín de la grúa y la cabeza de la armadura estén en la misma línea vertical. (Así el cabestrante principal tira verticalmente de la cabeza).



Manera correcta de izar la armadura del pilote.

Fuente: Adaptado de Desde el murete. (2015).

Con la grúa en la posición mostrada a continuación, se empieza a tirar de los dos cabrestantes al mismo tiempo, de manera que se levante ligeramente la armadura del suelo. El cabestrante principal tira de la cabeza y el auxiliar lo hace de la parte central.

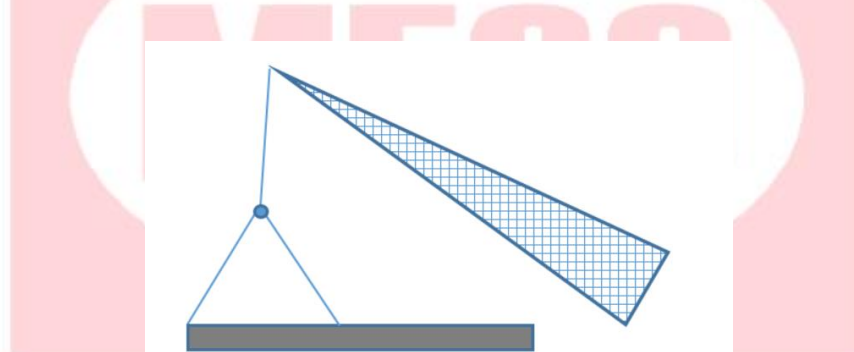


Implementación de dos cables independientes.
Fuente: Adaptado de Desde el murete. (2019).

Se empieza a recoger el cabestrante principal (en la cabeza) a la vez que se recoge en menor medida el auxiliar, lo que dará verticalidad a la armadura.

Se continúa con dicho movimiento hasta que la armadura esté prácticamente vertical, y llegado a este punto se destensa lentamente el cable del cabestrante auxiliar para dejar la carga al cable del cabestrante principal.

Importante: Nótese la diferencia entre la configuración mencionada (en donde se tira independientemente de dos cables) y la que se muestra seguidamente, en donde se tira de un solo cable y se pierde el alineamiento del cable respecto a la cabeza de la armadura.



Implementación de dos cables dependientes.
Fuente: Desde el murete. (2019).

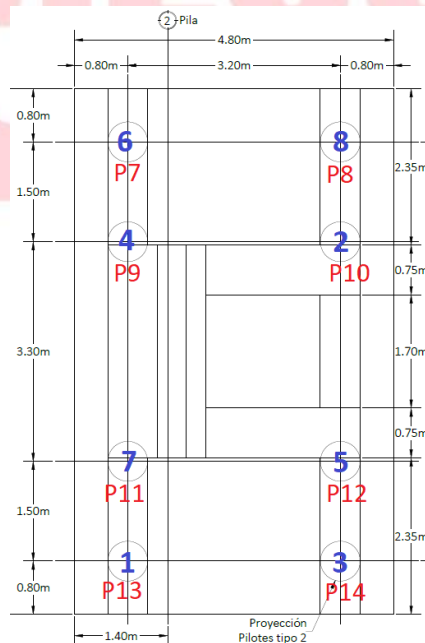
RECOMENDACIÓN CONSTRUCTIVA

FLUJO PERFORACIÓN/COLADO DE PILOTES

Se debe proponer un flujo de trabajo en la perforación de pilotes y el posterior colado de estos que respete CR-2010 565.05 (a) (mencionado anteriormente).

Por ejemplo:

Perforando Pilote	Último Pilote Colado	Distancia entre pilote perforado y colado
P13	-	-
P10	13	5,77
P14	10	4,8
P9	14	5,77
P12	9	4,6
P7	12	5,77
P11	7	4,8
P8	11	5,77
-	8	-



En el caso donde se da una distancia menor de 5 m (principalmente 4,6 m), el profesional de ingeniería a cargo de la dirección de obra determinará el momento en que se proseguirá con la perforación para cumplir las 20 horas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute. (2010). SPECIFICATION FOR TOLERANCES FOR CONCRETE CONSTRUCTION AND MATERIALS (ACI 117-10) AND COMMENTARY (ACI 117R-10) REVISIÓN 2015.

American Concrete Institute. (2019). REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL (ACI 318-19) Y COMENTARIO (ACI 318R-19).

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2010). CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA 2010 REVISIÓN 2014. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Desde el murete. (2015). IZADO DE ARMADURAS. PRIMEROS PASOS. <https://desdeelmurete.com/izado-de-armaduras-primeros-pasos/>

Desde el murete. (2019). IZADO DE UNA ARMADURA DE PILOTES. <https://desdeelmurete.com/izado-de-una-armadura-de-pilotes/>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES CR-2010.





OSCAR EDUARDO LIZANO GUTIÉRREZ
Ingeniería en Construcción
Tecnológico de Costa Rica
Noviembre, 2021

Anexo A

