



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO NO CONVENCIONAL DE UN
PUENTE EN ARCO (PUENTE VEHICULAR “SANTA MARÍA PICULA”)**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN CONSTRUCCIÓN PESADA

PRESENTA:

ING. JUAN MANUEL ESPINOSA HERRERA

DIRECTOR DE TESINA: **ING. GREGORIO LUCIO PONCELIS GASCA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

FEBRERO 2017

Dedicatorias

A mi Padre Divino, que me da la luz, la fuerza y la sabiduría que necesito para continuar mi camino y cumplir mi misión en esta vida.

A mi Virgencita de Guadalupe, porque me da la esperanza frente a la adversidad y me protege con su manto.

A mis maestros espirituales, que me guían por el camino de Dios y me permiten comprender los mensajes que da la vida.

A mis padres, que me dieron la vida y me han apoyado día con día en cada uno de mis sueños, haciéndome un hombre de bien.

A mis hermanas y sobrinos, que me han acompañado en las buenas y en las malas durante este camino.

A mi familia en general, porque cada momento me ha permitido crecer como persona y la sangre une de maneras incompresibles.

A mis amigos de toda la vida, gracias a ellos por todos los momentos que hemos pasado y que han fortalecido esta gran amistad, considerándolos parte de mi familia.

A mis maestros, que por transmitirme sus conocimientos han hecho de mí un profesional, gracias por su ayuda y por exigirme siempre ser mejor.

Agradecimientos

Al Ing. Gregorio Lucio Poncelis Gasca, que me ayudó en la elaboración de este trabajo, dirigiendo mi tesina y apoyándome con sus conocimientos de puentes.

Al Ing. Alejandro Calderón, que me tuvo la paciencia y se dio el tiempo para explicarme en persona el procedimiento constructivo del puente “Santa María Picula”.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Objetivo y Descripción General del Trabajo | 5 |
| 3. Estudios Previos y su Influencia en el Proyecto | 7 |
| 3.1 Estudio Topohidráulico..... | 7 |
| 3.2 Estudio Hidrológico | 9 |
| 3.3 Estudio Geotécnico | 9 |
| 3.4 Estudio de Impacto Ambiental..... | 10 |
| 3.4.1 Metodología de Evaluación..... | 11 |
| 4. Proyecto Estructural | 13 |
| 5. Construcción | 15 |
| 5.1 Programa General de Trabajo..... | 15 |
| 5.2 Preparación del Sitio y Trabajos Preliminares | 16 |
| 5.3 Descripción de Obras y Actividades Provisionales del Proyecto | 16 |
| 5.4 Procedimiento Constructivo | 19 |
| 5.4.1 Subestructura | 19 |
| 5.4.2 Superestructura | 37 |
| 5.4.3 Aproxes..... | 58 |
| 6. Conclusiones..... | 62 |
| 7. Anexos | 64 |
| Anexo 1 – Matriz de Leopold | 64 |
| Anexo 2 – Plano General del Puente..... | 65 |
| 8. Referencias | 66 |

1. Introducción

Los puentes comunican e integran a la sociedad, son parte esencial de la amplia red carretera de nuestro país, permiten atravesar accidentes geográficos como valles, barrancas y ríos; y conectar comunidades, ciudades, estados y regiones. Los puentes fomentan la producción, el comercio y el turismo; además de facilitar el acceso a servicios de educación y salud.

Los puentes son estructuras que integran ciencia, tecnología y estética; sus constructores se enfrentan al desafío de lograr la simplicidad funcional de su estructura, donde la belleza, siempre presente desde su concepción, está supeditada a la funcionalidad donde conviven proporción, orden y simplicidad.

Al igual que los edificios que con espectaculares despliegues técnicos se construyen cada vez con mayores alturas; los puentes también cada día se construyen más largos, uniendo lugares que en otros tiempos hubiera sido impensable; salvando también los obstáculos más inverosímiles.

Durante los últimos años, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha tenido infinidad de retos que enfrentar en materia de puentes, y hoy México es un país mejor comunicado gracias a la gran versatilidad que hemos tenido en el diseño de estas estructuras en todo el territorio nacional. Los beneficios sociales y económicos hablan por sí solos.

Los ejemplos abundan, sin embargo cada logro ha requerido de la conjunción de muchas voluntades para llevar a cabo estas obras. Los mejores diseñadores, proyectistas, ingenieros y constructores del país, han construido una gama numerosa de puentes en todas las modalidades imaginables, eficientando los procesos conocidos y adaptando nuevas tecnologías para lograr estructuras mejor construidas; en lugares remotos y con los máximos estándares de calidad. Así han llegado al país nuevos sistemas de colado de cimbra autodesplazables que logran reducir de manera significativa el tiempo de construcción, equipos sofisticados de medición permiten cálculos exactos para seguir los trazos carreteros, las nuevas tecnologías de fotogrametría han aportado mucha información del terreno que lleva a escoger las mejores rutas para desplegar el trazo de la carretera, la mecánica de suelos ha hecho más precisas las predicciones de los geólogos para determinar los lugares más adecuados para los desplantes de las estructuras. Por otro lado, el mejoramiento de los materiales de construcción como los concretos y las aleaciones de metales han aportado a las estructuras mayor resistencia y ligereza a un precio competitivo.

Sin embargo, todo lo anterior sería inútil sin el elemento humano. México es un país de grandes ingenieros dispuestos siempre a poner a prueba sus capacidades y determinación. En cada obra han hecho gala de su conocimiento técnico, su temple ante grandes adversidades y el cumplimiento de los tiempos exigidos para llevar a cabo su labor; nada los ha detenido.

El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y de la naturaleza del terreno sobre el que se construye.

Su proyecto y su cálculo pertenecen a la ingeniería estructural, siendo numerosos los tipos de diseños que se han aplicado a lo largo de la historia, influidos por los materiales disponibles, las técnicas desarrolladas y las consideraciones económicas, entre otros factores.

El éxito de un puente se cumple al satisfacer los objetivos básicos implícitos en su diseño, tales objetivos son, entre otros:

- ✓ Funcionalidad
- ✓ Seguridad
- ✓ Economía
- ✓ Estética
- ✓ Restricciones ambientales

La historia nos obliga a cambiar. No podemos seguir diseñando como hacían nuestros predecesores porque las circunstancias pueden ser diametralmente distintas. A finales del siglo XVIII todos los puentes eran de mampostería o madera. El primer puente de hierro fundido (el Iron Bridge, con 30 metros de claro) se realizó en Inglaterra hace 238 años y todavía existe.

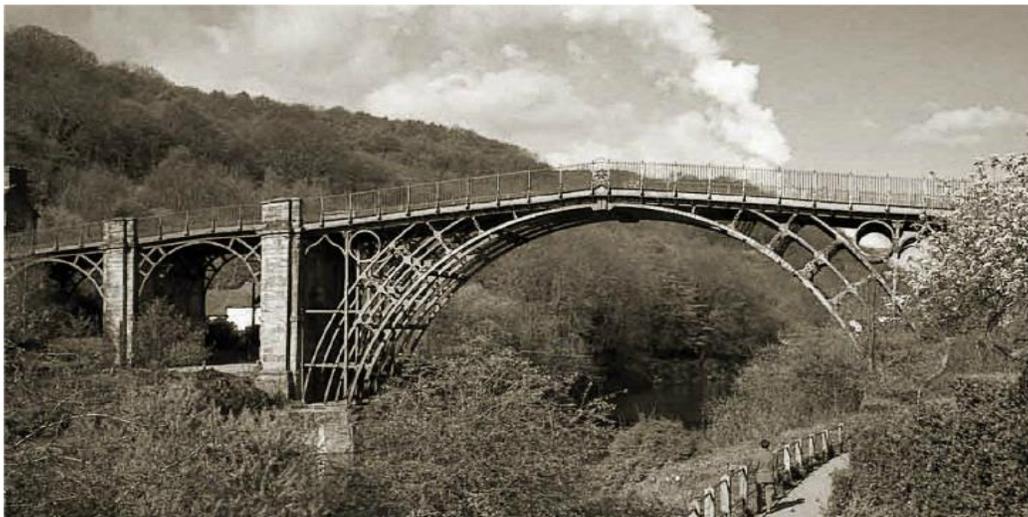


Figura 1.1 El Iron Bridge construido sobre el río Severn en Shropshire, Inglaterra. Fue el primer puente de estructura metálica construido en el mundo en 1779, aún está en uso.

Su diseño llevaba implícito el espíritu de la mampostería, lo que quizá podría explicar que el peso del hierro haya sido descomunal: varias veces más que el requerido actualmente para un puente de iguales dimensiones. Pero la hazaña preparó el terreno para enfrentar futuros retos.

Por otro lado, debemos recordar que nada es nuevo en este mundo. Los egipcios empleaban los atirantamientos hace varios milenios; los chinos y los romanos dominaban el arco desde hace siglos. Como ejemplo, en el siglo VI los chinos construyeron el puente Anji. Los europeos tardaron 800 años en aplicar lo que los chinos hicieron. No es que los chinos fueran mejores, simplemente se enfrentaron a otras necesidades y supieron resolverlas; la necesidad es la madre de las innovaciones.



Figura 1.2 Puente Anji o Zhaozhou, construido en China hacia los años 595-605. Localizado hacia al sur del país, en la provincia de Hebie, es el puente chino más antiguo aún en pie de este lejano país.

Los puentes son símbolo de civilización; nos han acompañado desde tiempos remotos; la naturaleza misma los puso en el camino de las tribus originarias para cruzar obstáculos.

El arco, elemento constructivo presente ya en culturas de la antigua región de Mesopotamia y que fue retomado por los romanos para construir puentes, acueductos o anfiteatros, posibilitó la creación de carreteras para administrar su imperio ya fuera en caminos y ciudades de Europa, como en buena parte de las zonas colonizadas por el Imperio.

En México, durante la época colonial, la construcción de puentes fue común. Tiempo después el ferrocarril, como nuevo medio de transporte y como uno de los pilares fundamentales del mundo moderno, vino a acelerar la construcción de

puentes cada vez más grandes, de diseño más elaborado y con técnicas de construcción más avanzadas donde ya estaba presente la estructura metálica.



Figura 1.3 Puente de Metlac del ferrocarril México-Veracruz. Este puente por su altura y singular estructura se convirtió en el símbolo de la vía férrea que une las dos ciudades. Fue un tema recurrente para pintores del siglo XIX. Esta espléndida fotografía es obra de Guillermo Kahlo, que la hizo por encargo de Ferrocarriles de México en 1903.

Los puentes siempre serán iconos de una época y testigos del avance tecnológico, social y económico de la historia de un país.

La aceleración de la economía en México hace indispensable crear más y mejores carreteras con trazos más rectos, en donde la eficiencia de gasto de combustible y la disminución de tiempos de recorrido satisfagan las necesidades del desarrollo económico.

Sin la capacidad de construir puentes en un país con una orografía tan accidentada como la de la República Mexicana, las posibilidades de crecimiento económico serían más lentas. Consciente de estas necesidades, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha construido más puentes en los últimos 20 años que los que se construyeron durante el resto del siglo XX. Carreteras como la Durango-Mazatlán y la México-Tuxpan, ambas con puentes de grandes dimensiones, son claro ejemplo de carreteras modernas que traerán beneficios tangibles en un futuro próximo.

Construir puentes no sólo es un desafío técnico para el ingenio de los constructores; un arte que sin duda dará nuevas satisfacciones.

2. Objetivo y Descripción General del Trabajo

El objetivo general de este trabajo consiste en explicar, conocer y describir el procedimiento constructivo no convencional del puente vehicular “Santa María Picula”, que fue construido sobre el río Claro, ubicado en el municipio de Tamazunchale, en el estado de San Luis Potosí, México.

A continuación se ubica el proyecto en la carta topográfica de INEGI esc. 1:50,000 Tamazunchale, F14D41.

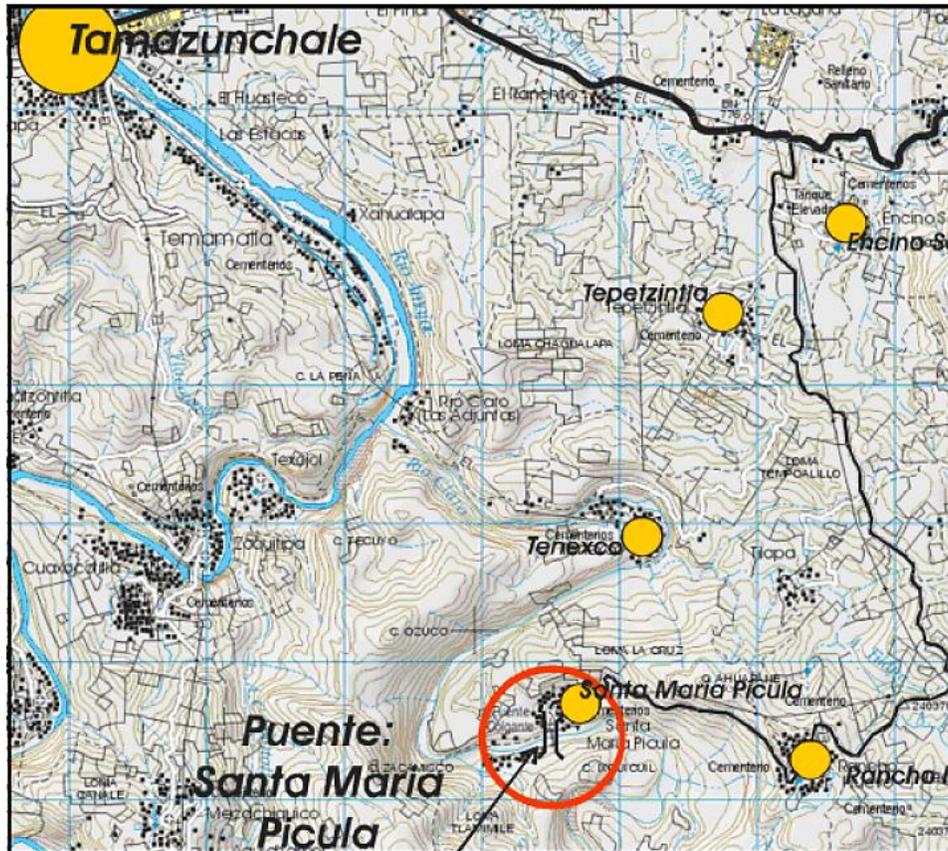


Figura 2.1 Carta topográfica F14D41, donde se señala con un círculo naranja la ubicación del proyecto, y asimismo con dos líneas de color negro se indica el área topográfica.

Previo a la construcción del puente vehicular ya se contaba con un puente colgante sobre el río Claro de uso peatonal, sirviendo como medio de comunicación entre las comunidades de Santa María Picula y Tezapotla del municipio de Tamazunchale en el Estado de San Luis Potosí; y las comunidades de Texopich, Acoyotla, Xiliapa, Xilitla y Coyutla del municipio de Tepehuacán de Guerrero en el Estado de Hidalgo, el cual se usaba como medio de transporte hacia la cabecera municipal de Tamazunchale con la finalidad de obtener el servicio de salud principalmente. Dicha obra presentaba problemas de inseguridad y un deficiente servicio para la transportación de bienes y servicios entre las

localidades mencionadas, por ello se vio la necesidad justificada de construir un puente vehicular que brindará mayor seguridad y servicio a estas localidades las 24 horas del día, los 365 días del año.



Figura 2.2 Se decidió construir y ubicar el puente vehicular paralelamente al puente peatonal, sobre el río Claro.

La obra consiste en una estructura de 110.0 m lineales, que tiene una sección de dos carriles, un ancho total de calzada de 7.0 m, para un camino tipo “C”, asimismo se construyeron guarniciones, parapetos de acero y dos banquetas con un ancho de 1.0 m. Lo anteriormente expuesto se ejecutó conforme a las Normas Técnicas de Construcción de la SCT.

Uno de los principales retos fue que no se podía invadir el cauce del río Claro, porque sus aguas aún no están contaminadas y su uso aguas abajo del puente es recreativo, impidiendo el uso de maquinaria y equipo pesado y dificultando a su vez los trabajos. Debido a esto se optó por construir el puente mediante un procedimiento constructivo no convencional.

Es importante saber que los puentes en arco trabajan transfiriendo el peso propio del puente y las sobrecargas de uso hacia los apoyos mediante la compresión del arco, donde se transforman en un empuje horizontal y una carga vertical; sin embargo, en el caso del puente “Santa María Picula” en particular, fue necesario construir primero la superestructura del puente y posteriormente el arco del mismo, haciéndolo trabajar como debía ser desde un inicio. Esto fue lo que hizo que fuese un procedimiento constructivo no convencional, porque normalmente para un puente de este tipo se comienza con la construcción del arco y después con la construcción de la superestructura.

La inversión requerida para la construcción del puente fue de \$ 25,000,000.00 (veinticinco millones de pesos 00/100 M.N.).

3. Estudios Previos y su Influencia en el Proyecto

La realización de estudios previos en todo proyecto es de fundamental importancia para lograr el éxito del mismo, ya que nos permiten recabar información necesaria sin la cual no sería posible llevar a cabo correctamente el proyecto. Particularmente en puentes, los estudios previos mínimos que se deben realizar según la importancia del puente son los siguientes: estudios topohidráulicos, estudios hidrológicos, estudios geotécnicos y estudios ambientales.

De ser posible, hay que obtener la información de estudios ya realizados de la zona donde se construirá el puente, aunque se tendrá que corroborar dicha información, debido a que en ocasiones ésta se genera con mucha anterioridad respecto al momento en que se ejecuta el nuevo estudio. Es necesario verificar que no se hayan sufrido cambios debido a construcciones tales como: presas, bordos, desvíos, encauzamientos, explotaciones de recursos y/o desastres naturales.

También las visitas de campo son importantes, pues nos permiten conocer aspectos que nos servirán para ejecutar de una mejor manera la obra, por ejemplo: observar por donde se tendrán más fácil los caminos de acceso, observar si hay obras cercanas que dificultarán los trabajos, ver las condiciones del terreno, apreciar los niveles de las crecientes máximas en el cruce por marcas visibles... entre muchas otras cosas. Ya que necesitamos información lo más precisa que se pueda con los recursos que contamos, para planear, diseñar y poder construir exitosamente un puente, y en sí, cualquier tipo de obra.

Es por todo esto que hay que tener pleno conocimiento del proyecto que vamos a ejecutar, pues mientras mayor información recabemos y tengamos del mismo, estaremos más preparados para hacer frente a los problemas que se presenten durante la realización de la obra.

Los estudios realizados para la selección del sitio, tanto análisis geotécnicos, hidrológicos, topohidráulicos y ambientales, se realizaron con miras a un diseño final, de un puente que resultara lo más económico posible y que ocasionara el menor daño ambiental, además de considerar que se construyera en el lugar más seguro, teniendo para ello un diseño que se adaptara a las características del sitio, implicando o considerando los menores riesgos hidráulicos y ambientales, por lo que estos estudios básicos y necesarios se realizaron previamente al diseño del proyecto.

3.1 Estudio Topohidráulico

El estudio topohidráulico es producto de la combinación del estudio topográfico y el estudio hidráulico, cuyo propósito es el contar con un levantamiento topográfico

planimétrico y altimétrico, en el que se tengan datos suficientes del terreno en el área de influencia del puente (estudio topográfico), y también, calcular el gasto de diseño del puente (estudio hidráulico).

Dentro de los criterios topohidráulicos se consideraron:

- Periodo de retorno.
- Gasto de diseño.
- Velocidad media.
- Nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME).

Es importante señalar que el método más empleado para calcular el gasto hidráulico de diseño es el Método Sección Pendiente, el cual debe cumplir ciertas restricciones que implica su utilización.

Como resultado del estudio topohidráulico se tienen:

- Planos del levantamiento topográfico.
- Planta general.
- Planta detallada.
- Perfil de construcción.
- Perfil detallado.
- Pendientes y secciones hidráulicas.

A partir de dichos planos se podrán definir parámetros importantes para la construcción del puente, siendo los siguientes:

- ❖ La ubicación del puente.
- ❖ El perfil sobre el eje del puente.
- ❖ La longitud del puente.
- ❖ La elevación de los elementos del puente.
- ❖ La elevación de la rasante en el cruce.
- ❖ Precisar la dirección y sentido de escurrimiento.
- ❖ Determinar el esviajamiento del puente.
- ❖ Funcionamiento hidráulico de la corriente.
- ❖ La pendiente geométrica del perfil del fondo del cauce.
- ❖ La pendiente hidráulica, que corresponde al perfil de la superficie del agua.
- ❖ La magnitud de los tirantes y las elevaciones de la superficie del agua en las secciones hidráulicas.
- ❖ Definir los niveles alcanzados por el agua en el cauce, el NAME (nivel de aguas máximas extraordinarias), el NAMI (nivel de aguas mínimo) y el NAMO (nivel de aguas máximas ordinario).

3.2 Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico tiene como propósito el calcular el gasto de diseño de un puente, de ser posible se podrá calcular a partir de la información de lluvias registradas en estaciones pluviográficas y/o pluviométricas en el área de influencia de la cuenca de la región y/o de las más cercanas donde se construirá el puente, para compararlo con el gasto de diseño calculado con el estudio topohidráulico.

Se debe contar con un estudio geológico de la zona donde se construirá el puente a fin de poder inferir la infiltración del agua de lluvia en la cuenca.

También de ser posible se debe contar con fotografías aéreas e información fisiográfica de la cuenca de la región, con la finalidad de analizar el comportamiento de la corriente.

Entre algunos métodos empleados para el cálculo del gasto de diseño están: Método de Comparación de Cuencas y el Método Racional Americano.

3.3 Estudio Geotécnico

Contar con los estudios de Geotecnia o Ingeniería geotécnica pertinentes, permite conocer las características y propiedades mecánicas del suelo y del terreno donde se realizará el proyecto de construcción, con el objetivo de delimitar las necesidades y alcances del proyecto integral en materia de sistemas constructivos, obra civil, estructuras y cimentaciones.

Para realizar el estudio geotécnico se parte de una campaña de prospección y reconocimiento del terreno, tomando muestras para su ensayo en laboratorio que permiten definir los parámetros geotécnicos característicos.

El análisis de suelos se realizó con el propósito de asegurar la integridad estructural del puente propuesto y de sus accesos, ya que son de especial importancia los efectos de socavación en los cimientos del puente y de erosión en los estribos, accesos y orillas del río sin las apropiadas estimaciones de profundidad de socavación, identificación de materiales erosivos, etc. Por lo que los criterios geotécnicos estuvieron guiados por:

- Perforaciones geotécnicas hasta profundidades de materiales consolidados o roca madre y profundidades de socavación estimada.
- Análisis de plasticidad y granulometría de materiales del lecho del río y orillas a ser utilizadas en la determinación de socavación y erosión.
- Análisis de muestras de perforaciones o muestras de tierras para determinar la fuerza o resistencia del suelo, características de consolidación y asentamiento, necesidades de compactación, etc.

3.4 Estudio de Impacto Ambiental

En la construcción del puente “Santa María Picula” el estudio de impacto ambiental fue particularmente el de mayor relevancia, debido a que la Comisión Nacional del Agua impuso como requisito que durante la construcción del puente no se metiera equipo y maquinaria dentro del agua del río Claro; esto porque las aguas del río aún no están contaminadas y además porque aguas abajo su uso es de recreación, doméstico y agropecuario, y de lo contrario se generaría un impacto ambiental. Esto fue el factor determinante para optar por un procedimiento constructivo innovador para la realización de este proyecto.



Figura 3.1 Las aguas del río Claro aún no están contaminadas, y en ellas se presentan la formación de tinajas o albercas naturales, donde la población hace actividades recreativas (aguas abajo).

El sentido de escurrimiento del río Claro es contrapendiente debido a las formaciones geológicas de la región, es por ello que inclusive en época de estiaje hay presencia de agua, pues ésta es atrapada y almacenada en zonas específicas, formándose albercas naturales que la población aprovecha y explota como atracción turística.

Se elaboró una manifestación de impacto ambiental (MIA), que es el documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo. Hay que tener claro que impacto ambiental es la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

La selección del sitio donde se construyó el puente tuvo relación con la alineación del camino existente, donde se tomaron en consideración los siguientes criterios generales:

- Máxima eficiencia económica.

- Mínimo impacto ambiental.
- Cimientos y accesos considerados como sólidos y seguros.



Figura 3.2 Vista hacia enfrente de la selección del sitio, donde fue construido el puente vehicular sobre el río Claro, indicando con la flecha la dirección que tendría el puente.

3.4.1 Metodología de Evaluación

Se usó una matriz de Leopold, (ver en Anexo 1), la cual se modificó y acondicionó para determinar las interacciones entre las actividades de la obra y los factores ambientales potencialmente afectados sobre los cuales incidirían, además se estimó el grado de interacción, es decir, se determinó de manera semicuantitativa la intensidad y magnitud de dicho efecto. La matriz no es propiamente un modelo para realizar estudios de impacto ambiental, pero sí es una forma que nos permite sintetizar y visualizar los resultados de tales estudios donde ofrece las ventajas de:

- ✓ Relacionar impactos con acciones.
- ✓ Buen método para mostrar resultados preliminares.

Para la identificación de los impactos se manejó una simbología donde se señalaron las principales actividades en cada una de las etapas de construcción del puente que se consideraron afectarían a los componentes ambientales.

Tabla 3.1 Simbología utilizada para identificar los impactos ambientales durante la construcción del puente.

| TIPO DE IMPACTO | SIMBOLO |
|-------------------------------------|---------|
| Impacto Adverso Significativo | A |
| Impacto Adverso Poco Significativo | a |
| Impacto Benéfico Significativo | B |
| Impacto Benéfico Poco Significativo | b |
| Impacto Mitigable | / |

Esta evaluación cualitativa permitió visualizar globalmente el número de impactos adversos y benéficos resultante de las interacciones entre actividades a realizar contra los elementos del sistema ambiental (físico, biótico y socioeconómico), obteniéndose un total de impactos (115) entre adversos (57) y benéficos (58);

interpretando la naturaleza, magnitud, duración, reversibilidad y la necesidad de aplicación de medidas correctivas tomando en consideración su importancia.

Algunas de las actividades que se tenían que ejecutar implicaban impactos adversos no significativos y residuales de baja magnitud. Estos impactos se debieron a las actividades de cortes y excavaciones, rellenos, construcción de terracerías y circulación vehicular. Es preciso hacer notar que se trató de un número bajo de impactos debido a que se trataba de un tramo muy corto (155.6 metros lineales), en una zona que por décadas ha sufrido disturbio de la deforestación por el afán de sus habitantes de incorporar estas tierras a las actividades antropogénicas, por lo que se considera que las fuentes de cambio así como perturbaciones y efectos que se darían debido a la construcción del puente, no eran significativas que pudieran modificar, alterar y/o cambiar el escenario existente en el sitio en donde se estableció la obra.



Figura 3.3 Condiciones tanto físicas como bióticas en la salida del puente previo a su construcción, en donde puede observarse que sus elementos habían sido modificados con anterioridad por la construcción del camino existente.

Las medidas de mitigación para los impactos adversos no significativos identificados en la matriz (de Leopold), lograron reducir la significancia de los mismos. Se trató de medidas sencillas, de costos razonables, de fácil aplicación y realización; que se enfocaron en la prevención, remediación, reducción, rehabilitación y compensación de los mismos. Las medidas de mitigación se propusieron a partir de la identificación y evaluación de los impactos ambientales, y se pueden consultar con más detalle directamente en la manifestación de impacto ambiental (MIA), encontrando la liga en las referencias de este trabajo.

Finalmente, como resultado del estudio de impacto ambiental se concluyó que el puente “Santa María Picula” mejoraría considerablemente la calidad de vida de la localidad, representando a su vez parte fundamental para el desarrollo armónico e integral de las comunidades más importantes del municipio de Tamazunchale, siendo viable la construcción del mismo desde el punto de vista ambiental.

4. Proyecto Estructural

La elección del tipo de sistema estructural es una de las etapas más importantes en la elaboración del proyecto de un puente.

En general, se debe tener presente:

- a) Las condiciones naturales del lugar donde se construirá la obra (estudios previos).
- b) Las diversas soluciones técnicamente factibles de acuerdo a las dimensiones del proyecto.

En base a lo anterior, se deben preparar anteproyectos y luego de una evaluación técnico-económica elegir la solución más conveniente.

La vía ó camino impone condiciones como: ancho, alto, tráfico, tipo de vehículos, peralte y trazo en planta (geometría). Lo cual genera los datos y variables que repercuten en el dimensionamiento funcional (diseño) del puente.

El claro del puente es el primer parámetro a considerar cuando se inicia el proceso de selección del tipo o tipos de puentes a estudiar. Y este caso no fue la excepción.

Como fue mencionado anteriormente, se tenía la restricción por parte de la Comisión Nacional del Agua de no meter maquinaria al cauce del río Claro, lo cual fue de fundamental importancia para la selección del tipo de puente, ya que para cumplir con ello se tenía que construir el puente con un claro central de por lo menos 55.0 m de largo. Entre las opciones que se analizaron estaba que se salvara dicho claro con traveses metálicas simplemente apoyadas de la misma longitud; sin embargo, esto provocaba que las traveses tuvieran un peralte muy grande, haciendo a su vez que la rasante del puente se incrementara. Fue por ello que mejor se optó por construir un arco además de las traveses en este claro central que era el más problemático, y con ello se logró el nivel requerido de la rasante, además de que no se corría peligro de la formación de una gran represa.

Una vez definido que sería un puente en arco, se fijó el tipo de superestructura y subestructura más convenientes de acuerdo a los requerimientos geométricos, económicos, estéticos y ambientales del proyecto. Se fijaron además, la longitud de los tramos del puente, los sistemas de cimentación, así como sus profundidades aconsejables en función de la capacidad de carga del terreno incluidas las profundidades estimadas de socavación. Esto se puede ver con detalle en el plano general del puente (anexo 2).

Es importante mencionar que los puentes son normalmente idealizados como vigas simplemente apoyadas, y que los momentos flexionantes se calculan a la mitad del claro. Por lo tanto es conveniente calcular esfuerzos en puentes modelados como placas y sometidos a escenarios reales.

El vehículo de diseño utilizado para la construcción del puente “Santa María Picula” fue un camión T3-S3 Tipo I, el cual es un vehículo virtual que propone el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y la SCT para evaluar la carga viva vehicular y hacer el análisis de diseño estructural del puente, con el fin de obtener un factor de seguridad adecuado, pues es común que en nuestro país circulen vehículos con mayor peso y dimensión de lo permitido, lo cual se considera con este vehículo virtual, teniendo un peso total de 48.50 Ton. Con una distribución de cargas sobre sus ejes y dimensiones como se muestran a continuación. Las dimensiones están en centímetros.

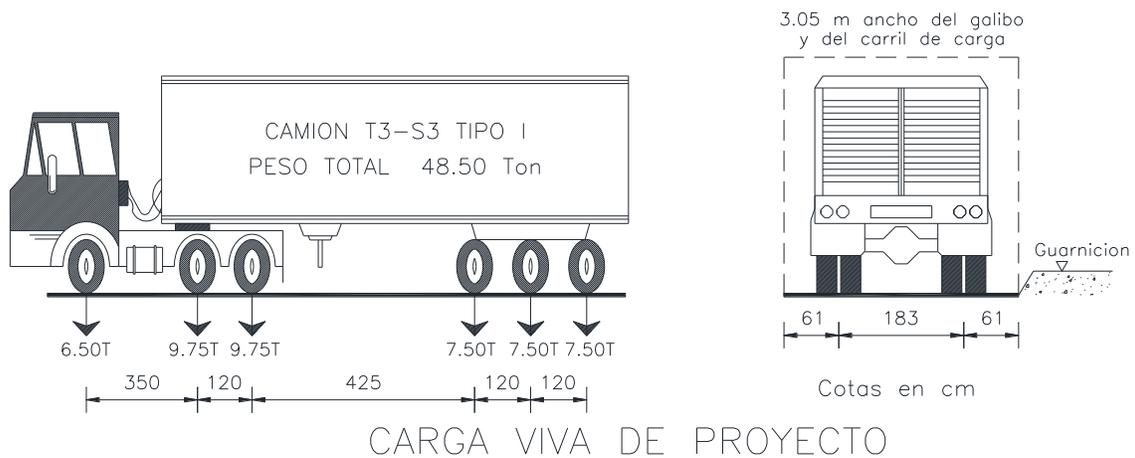


Figura 4.1 Vehículo de diseño utilizado para el análisis estructural del puente.

Finalmente se realizaron los planos de la ingeniería de detalle y fabricación de los elementos estructurales que conforman el puente. Esta es una etapa fundamental, ya que es necesario elaborar con el mayor detalle posible todos los planos, de tal forma que se minimicen los posibles errores o malas interpretaciones en la fabricación de las traveses.

No se tiene una metodología precisa ni una fórmula mágica para la elección del tipo de sistema estructural a implementar en un puente, por ello es necesario analizar todas las circunstancias particulares que enfrenta cada obra a realizar, para escoger el proyecto que represente la mejor opción dentro de lo posible.

5. Construcción

La construcción es la etapa de un proyecto que nos permite que éste se materialice a partir de su diseño y de su debida planeación, siendo por ello una parte determinante para el éxito del proyecto, pues es donde se presentan la mayoría de los problemas que hay que resolver lo mejor y lo más rápidamente posible, esperando que sean mínimos habiendo realizado una buena planeación.

El proyecto consiste en un puente vehicular con cuatro claros, a la entrada tiene un claro entre el caballete No. 1 y la pila No. 2 de 20.0 m, el segundo claro entre la pila No. 2 y la pila No. 3 corresponde a 55.0 m, el tercer claro entre la pila No. 3 y la pila No. 4 es de 20.0 m, el cuarto y último entre la pila No. 4 y el caballete No. 5 corresponde a 15.0 m, esto con la finalidad de cruzar el río Claro. Tiene una sección de dos carriles y un ancho total de calzada de 7.0 m para un camino tipo "C", asimismo se construyeron guarniciones, parapetos, remates y dos banquetas de 1.0 m. El puente tiene una longitud de 110.0 m lineales. La superestructura del puente está formada por vigas de acero tipo A-992, y el ancho total de la superestructura es de 9.80 metros. La subestructura está formada por un caballete a base de muro de retención, cabezal y sus respectivos aleros en el primer apoyo, los apoyos 2, 3 y 4 fueron a base de pilas coladas en el lugar, el apoyo 5 es un caballete de geometría igual al primer apoyo (ver plano general del puente en el anexo 2).

Los aproches del puente se consideraron sólo hasta el camino de terracería existente. Se construyeron terraplenes con material pétreo en sus diferentes capas. El pavimento fue rígido, por lo que se construyeron solamente una base hidráulica y una losa de concreto hidráulico.

A continuación se describirán las principales actividades realizadas para la construcción del puente en arco "Santa María Picula".

5.1 Programa General de Trabajo

La Junta Estatal de Caminos del Gobierno del Estado tenía programado que los trabajos se realizaran en seis meses. A continuación se presenta el cronograma general.

* El primer mantenimiento preventivo se realizará aproximadamente a los 15 años de haberse construido, éste estará en función de la vida útil de los materiales, las repeticiones de las cargas y pesos de los vehículos.

** El abandono del sitio no se contempla.

Tabla 5.1 Cronograma general.

| Principales actividades a realizar | Meses | | | | | |
|---|-------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| REPLANTEO DEL TRAZO | X | | | | | |
| DESPALME | X | | | | | |
| CORTES | X | | | | | |
| TERRAPLENES | X | X | X | | | |
| SUBESTRUCTURAS, ESTRUCTURAS Y SUPERESTRUCTURAS DEL PUENTE | | X | X | X | | |
| PAVIMENTACION | | | | | X | |
| SEÑALIZACION | | | | | | X |
| MANTENIMIENTO * | | | | | | |
| ABANDONO DEL SITIO ** | | | | | | |

5.2 Preparación del Sitio y Trabajos Preliminares

La preparación del sitio consistió en obtener primeramente los permisos requeridos para su construcción por parte de la Comisión Nacional del Agua, ya que dicha obra se ubica en terrenos de propiedad federal que regula este organismo, posteriormente se realizaron las actividades de:

La delimitación del área topográfica donde se especificaron los frentes de trabajo y los sentidos del tránsito de la maquinaria a utilizar.

Con la autorización de la Comisión Nacional del Agua se trazaron en campo los principales elementos, sobre todo el eje donde se realizó la construcción, y algunos de los puntos característicos se referenciaron a bancos de nivel que sirvieron en el proceso constructivo. Este trabajo lo ejecutó una brigada topográfica con el uso de una estación total.

Apoyados en el eje del trazo se delimitó el procedimiento constructivo, con cada uno de los diferentes grupos de trabajo especializados en cada proceso.

Y por último se realizó el despalme, esta actividad consistió en retirar la capa vegetal, la cual se almacenó a las orillas de ceros de la sección del trazo, para posteriormente arropar los taludes de los terraplenes y propiciar la generación de gramíneas (familia de plantas herbáceas).

5.3 Descripción de Obras y Actividades Provisionales del Proyecto

En muchas ocasiones al pensar en la construcción de una obra sólo nos concentramos en el procedimiento constructivo, pero son muchas más las actividades que conlleva la realización de un proyecto, e implican a su vez que les dediquemos el tiempo necesario para resolver sus dificultades al enfrentarlas, porque dichas acciones nos ayudarán a la facilitación y concepción de dicha obra. Es por ello que cuando escuchemos hablar de una construcción; borremos ese paradigma de creer que su realización únicamente conlleva la etapa constructiva.

En los siguientes párrafos se describirán las obras y actividades provisionales para la realización de este proyecto.

El principal acceso durante las fases de preparación del sitio y construcción fue a través de la Carretera Federal No. 102 Tamazunchale – Huejutla – El Álamo Veracruz, aproximadamente a media hora de recorrido de la cabecera municipal de Tamazunchale, a mano derecha entronca la carretera alimentadora que comunica a la localidad de Santa María Picula, la cual se utilizó para el transporte del equipo y personal necesario al frente de trabajo.

Hubo necesidad de utilizar materiales de origen pétreo, campamentos, almacenes, oficinas, laboratorios de control de calidad de los materiales, parques de maquinaria para almacenamiento y reparación del equipo, plantas de trituración, etc.

Todas estas obras provisionales necesarias para la construcción de la obra principal se ubicaron en la cabecera municipal de Tamazunchale, ya que ahí se cuenta con los servicios de luz eléctrica, agua potable, teléfono, drenaje, etc., y se encuentra aproximadamente a 45 minutos de la zona donde se ubica el proyecto. Lo cual benefició a los habitantes de la cabecera municipal, pagando renta por las áreas a ocupar y los servicios, lo cual generó a su vez temporalmente algún tipo de empleo entre sus habitantes.

La utilización de los materiales pétreos provenientes de los bancos de materiales para la formación de los accesos al puente, es decir, la construcción de las terracerías y pavimentos, quedaron a libre elección del contratista; siendo su responsabilidad el obtener los permisos y realizar los estudios en materia de impacto ambiental ante las autoridades correspondientes para poder explotarlos, además de contemplar los estudios de control de calidad de los materiales pétreos para el proceso constructivo. Lo anterior en base al Artículo No. 67 de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas.

Como obras asociadas para este proyecto sólo fueron necesarios los sanitarios portátiles en el frente de trabajo. El manejo y la limpieza de dichos sanitarios estuvo a cargo de la empresa prestadora de servicios.

Los combustibles fueron almacenados en tambos cerrados de 200 litros, los cuales se ubicaron en sitios específicos en el frente de trabajo teniendo buena ventilación y alejados de sitios de pernocta, maniobras o mantenimiento. Estos se surtieron de los centros de distribución concesionados por Pemex más cercanos al proyecto.

De acuerdo al número de vehículos estimados para realizar la construcción del puente durante los 6 meses que se estimó durasen los trabajos, aproximadamente se consumieron:

Tabla 5.2 Volumen aproximado consumido de combustibles.

| Tipo | Volumen (lts) |
|-------------|---------------|
| Diesel | 39,000 |
| Gasolina | 3500 |
| Lubricantes | 250 |

Los volúmenes anteriores se calcularon en función de la capacidad de los depósitos con el que contaba cada máquina, por el tipo de trabajo a realizar por cada equipo, y el tiempo necesario para agotar el volumen de cada depósito.

A continuación se relaciona el equipo y maquinaria que se utilizó en la construcción de la obra.

Tabla 5.3 Equipo y maquinaria utilizados en la construcción de la obra.

| Equipo | Cant. | Tiempo empleado en la obra | Horas de trabajo diario | Decibeles emitidos | Emisiones a la atmósfera (g/s) ² | Tipo de combustible |
|----------------------------|-------|----------------------------|-------------------------|--------------------|---|---------------------|
| Camión Volteo | 4 | 6 Meses | 8 | 108 | 0.23 | Diesel |
| Cargador frontal | 1 | 6 Meses | 8 | 104 | 0.046 | Diesel |
| Perforadora de pilotes | 1 | 3 Meses | 8 | 103 | 0.046 | Diesel |
| Placa vibratoria | 1 | 1 Mes | 8 | 96 | 0.069 | Gasolina |
| Retroexcavadora | 1 | 2 Meses | 8 | 103 | 0.046 | Diesel |
| Revolvedora | 2 | 3 Meses | 8 | 96 | 0.069 | Gasolina |
| Rodillo compactador manual | 2 | 2 Meses | 8 | 92 | 0.023 | Diesel |
| Tractor D-8 | 1 | 1 Mes | 8 | 103 | 0.046 | Diesel |
| Vibrador de concreto | 2 | 3 Meses | 8 | 81 | 0.069 | Gasolina |
| Grúa Hidráulica | 1 | 1 Mes | 8 | 92 | 0.023 | Diesel |
| Bomba y Gatos Hidráulicos | 2 | 1 Mes | 8 | 81 | 0.069 | Gasolina |
| Inyectadora de Lechada | 1 | 1 Mes | 8 | 81 | 0.069 | Gasolina |
| Planta de Luz Trifásica | 1 | 6 Meses | 8 | 96 | 0.069 | Gasolina |
| Motoconformadora | 1 | 4 Meses | 8 | 103 | 0.023 | Diesel |
| Petrolizadora | 1 | 2 Meses | 8 | 109 | 0.023 | Diesel |
| Vibrocompactador | 1 | 3 Meses | 8 | 108 | 0.023 | Diesel |
| Camionetas Pick Up | 2 | 6 Meses | 8 | | | Gasolina |

El personal necesario para la construcción del puente fue de aproximadamente 68 personas, trabajando turnos diurnos de 8 horas. La construcción del puente se llevó a cabo con la gente de la comunidad, la cual no sabía leer ni escribir, e inclusive a algunos se les dificultaba hablar el español porque seguían conservando su idioma indígena. Estos lugareños fueron capacitados sobre la marcha del proyecto para no perder tiempo en el arranque de los trabajos.

Solamente fue necesario llevar cierta mano de obra calificada, sobre todo en la etapa de construcción, debido a que se requirieron oficiales en carpintería, fierros y soldadores, así como 2 oficiales especializados en estructuras de acero. También hubo necesidad de contar con personal administrativo.

Tabla 5.4 Personal necesario para la construcción del puente.

| Etapa | Tipo de mano de obra | Tipo de empleo | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------|----------|-----------------|--------------------|
| | | Permanente | Temporal | Extra-ordinario | Disposic. Regional |
| Preparación del sitio | No calificada (9) | | √ | | √ |
| | CALIFICADA (3) | √ | | √ | |
| Construcción | No calificada (35) | | √ | √ | √ |
| | Calificada (15) | (5) | (10) | √ | |
| Operación | No calificada (0) | | | | |
| Mantenimiento | Calificada (6) | | √ | | √ |

5.4 Procedimiento Constructivo

Un puente está dividido de forma general en: subestructura, superestructura y apoyos. Esto nos sirve para fines de distinguir etapas constructivas y partidas durante el proceso de cotización y construcción de los puentes.

A continuación se describirán las etapas constructivas que se llevaron a cabo durante la construcción del puente en arco “Santa María Picula”, con la limitante ya mencionada de no tocar el cauce del río Claro, siendo un verdadero reto por ser el pionero en haber sido construido mediante un procedimiento constructivo no convencional para un puente de este tipo. Cabe aclarar que fue un procedimiento constructivo no convencional debido a que normalmente se comienza con la construcción del arco del puente y posteriormente con la construcción de la superestructura del mismo. Pero en este caso primero se montaron las traveses de la superestructura y después se construyó el arco del puente.

5.4.1 Subestructura

Una vez terminados los trabajos preliminares se dio comienzo a la primera etapa constructiva del puente, la cual consistió en construir la cimentación del mismo a

base de zapatas corridas desplantadas sobre pilas de sección circular. Primeramente se tuvo que acondicionar el terreno para que se pudiera trabajar adecuadamente, esto se logró con la ayuda de un tractor D-8. El operador del tractor se encargó de facilitar un camino de acceso para poder arrancar los trabajos. El producto de la excavación fue vaciado a un camión de volteo con la ayuda de una retroexcavadora, el cual fue llevado a un banco de tiro autorizado por la dependencia.



Figura 5.1 Tractor D-8 facilitando el acceso para la construcción del puente.

Se tuvo que transportar también la máquina perforadora al lugar de la obra lo cual fue una verdadera hazaña, se montó sobre un tráiler y fue transportada lo más cerca posible al lugar de la obra. Ya estando cerca se tuvo que ampliar el camino en algunas zonas, se fue llevando en etapas y con todos los cuidados necesarios. Se desarmó lo más posible quitándole todas las partes altas que podían provocar inestabilidad. La llegada de dicha máquina al sitio tardó una semana, y su salida de la obra una vez concluidos sus trabajos llevó inclusive un poco más de tiempo.

Fue colocada en los puntos específicos en que se realizarían las perforaciones para alojar las pilas de cimentación con diámetro igual a 1.2 m. En total se realizaron 22 pilas coladas en sitio; 9 en el segundo apoyo, 9 en el tercer apoyo y 4 en el cuarto apoyo del puente.

Esta máquina llegó por la margen derecha del río, en la que estaban la tercer y cuarta pila del puente; sin embargo, del otro lado del río se tenía el segundo apoyo

donde también había que excavar para construir pilas de cimentación. Para cruzar el río se tuvo que transitar la máquina aguas abajo hasta un lugar donde la gente ya no hacía uso recreativo del mismo. La perforadora pudo cruzar por un vado cuyo terreno había sido aplanado previamente con la retroexcavadora, para que no se volteara por la presencia de algún boleo.

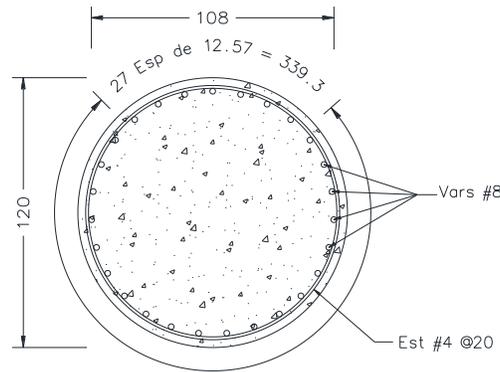


Figura 5.2 Sección de pila colada en sitio.

Con la máquina perforadora se hincó un ademe de tubo de acero en la posición donde se iba a realizar la excavación, con la finalidad de tener una estabilidad en la parte superior del terreno durante la perforación, por el tipo de material y porque había presencia de agua pues el río Claro estaba a un costado.



Figura 5.3 Inserción de ademe metálico recuperable.

Posteriormente se realizó la perforación hasta la profundidad de 16.0 m señalada en el proyecto. Se llevaba una gran variedad de brocas (botes, botes con corona, etc.), para abatir los materiales que se encontraban, la cual se cambiaba cuando había presencia de boleas. Conforme se iba perforando también se iba inyectando lodo bentonítico, pues el adomado solamente fue parcial y se debía contener y mantener estable toda la excavación. Para la creación del lodo se utilizaron sacos de bentonita de 50 kg.



Figura 5.4 Construcción de pilas coladas en sitio.

Terminada la perforación se procedió a introducir el acero de refuerzo de las pilas, colocando además soportes espaciadores para garantizar el recubrimiento mínimo. Se realizó con la misma piloteadora, lo cual no es ideal, pues es conveniente que una grúa se encargue de ello para que la perforadora continúe haciendo las pilas, y así eficientar la construcción de las mismas, pero debido a la escasez de maquinaria se decidió hacerlo así. Dicho armado una vez en posición se dejó colgando de una viga de madera.

El armado de acero debía estar listo previamente para no retrasar más los trabajos, aprovechando el tiempo que tardó en llegar la piloteadora para ello. El acero utilizado tuvo un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ y el armado fue realizado por cuadrillas de fierros.

El producto de excavación de las pilas fue vaciado a un camión de volteo con ayuda de una retroexcavadora con cargador frontal, el cual a su vez lo llevó al banco de tiro autorizado.



Figura 5.5 Retroexcavadora con cargador frontal.

Estando el armado en su lugar siguió el colado del concreto de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, llevándose a cabo con el uso de tubería Tremie para evitar la segregación del mismo. La tubería fue colocada en su posición con la máquina perforadora.

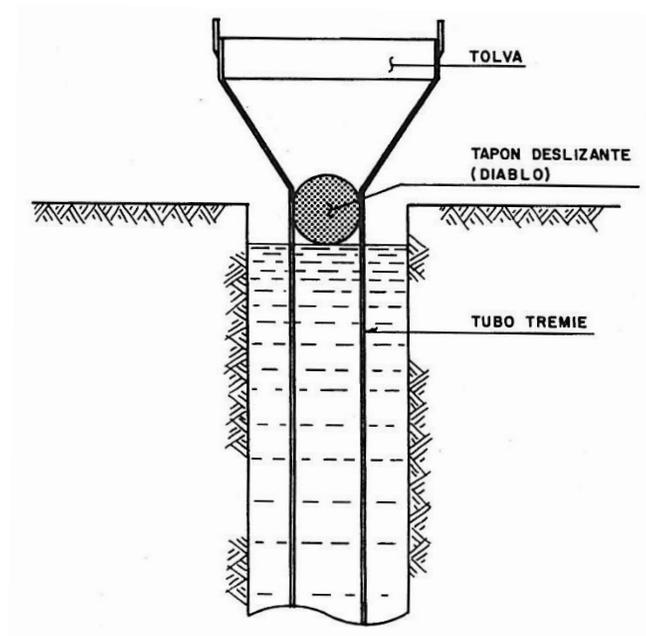


Figura 5.6 Tubería Tremie.

Esto se logra gracias al tapón deslizante que permite que el concreto vaya bajando uniformemente y no caiga de una manera brusca. El concreto es vaciado en la tolva y va desplazando al tapón, el cual una vez que sale de la tubería flota a la superficie. Cuando el concreto llega al fondo de la excavación desplaza al lodo bentonítico por diferencia de densidades hasta que finalmente cubre toda la excavación. Una vez que ocurrió esto se retiró el ademado. El ademe sólo fue necesario en las pilas más cercanas al lecho del río. Inclusive en la mayoría de las pilas del segundo apoyo no fue necesario introducir lodo bentonítico pues el material era muy estable.

En términos generales, el concreto debía ser colado una vez terminada la perforación, y a su vez, debía ser expedito y continuo, evitando interrupciones mayores de 20 minutos o duraciones que excedieran el tiempo de fraguado inicial del concreto empleado, a fin de evitar deficiencias.

Durante este proceso, el lodo que va siendo expulsado debe ser retirado y almacenado en un depósito con el uso de una bomba hidráulica, para no contaminar el agua de río y posteriormente llevarlo a una planta de tratamiento.

Una vez endurecido y alcanzada cierta resistencia del concreto se realizó el descabece de la pila con pistolas neumáticas, pues el concreto en esta zona queda contaminado con bentonita por el contacto que tienen estos materiales durante el colado.



Figura 5.7 Pila descabezada y lista para la unión con la zapata.

Como se observa en la imagen 5.7, se dejó acero sobresaliendo de cada una de las pilas, pues permite la unión con el siguiente elemento que es la zapata.

En total se construyeron tres zapatas corridas, las de los apoyos No. 2 y 3 con dimensiones de (9.0 m x 9.0 m x 1.6 m); y la del apoyo No. 4 con dimensiones de (5.5 m x 9.0 m x 1.2 m).

Para la construcción de las zapatas se tuvo que emparejar el terreno y limpiar bien la zona con la ayuda de la retroexcavadora. Es común que se construya una plantilla de concreto pobre ($f'c=100 \text{ kg/cm}^2$), con la finalidad de permitir mayor facilidad de trabajo, pero sobre todo, para que el terreno no absorba el agua del concreto definitivo a la hora de colarlo. Sin embargo en este caso no fue necesario, ya que el material tenía suficiente humedad dado que se tenía presencia de agua porque estaba el río a un costado.

Se realizó el armado de cada zapata y se traslapó con el acero sobresaliente de las pilas coladas en sitio. Posteriormente se cimbró con madera para obtener las dimensiones requeridas por el proyecto. Finalmente se coló y vibró el concreto de $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$.

Cabe mencionar que para fabricar el concreto se utilizó una revolvedora pequeña para producir la mezcla en sitio, con capacidad de 3 m^3 aproximadamente. Con una pala cargaba por sí misma todos los materiales y dosificaba la mezcla por peso, pues tenía además una báscula. Mientras que el agua la inyectaba de un depósito propio, y los costales de cemento se vaciaban directamente en la pala. Esta máquina cruzaba el río por un vado aguas abajo para transportar el concreto, lo hacía con el uso de neumáticos, sin producir un impacto ambiental significativo.



Figura 5.8 Revolvedora cruzando el río Claro por un vado aguas abajo para transportar el concreto.

La arena y el agregado grueso eran traídos de un banco de materiales escogido y aprobado de la región, a partir del cual el camión de volteo tardaba cerca de dos horas en llegar al sitio de la obra. Los materiales eran depositados y almacenados en un lugar específico dentro de la obra, para que posteriormente la dosificadora los cargara en su olla e hiciera el concreto.



Figura 5.9 Camión de volteo trayendo los agregados pétreos del banco de materiales.

La construcción de los caballetes y pilas comenzó por los apoyos que estaban a la margen derecha del río, pues era por donde se tenía más fácil el acceso. Conforme se fue avanzando en esta etapa constructiva se fueron construyendo también los de la margen izquierda.

En las siguientes figuras se pueden ver las dimensiones de los caballetes No. 1 y 5, tomadas de los planos originales del proyecto. Las dimensiones están en centímetros.

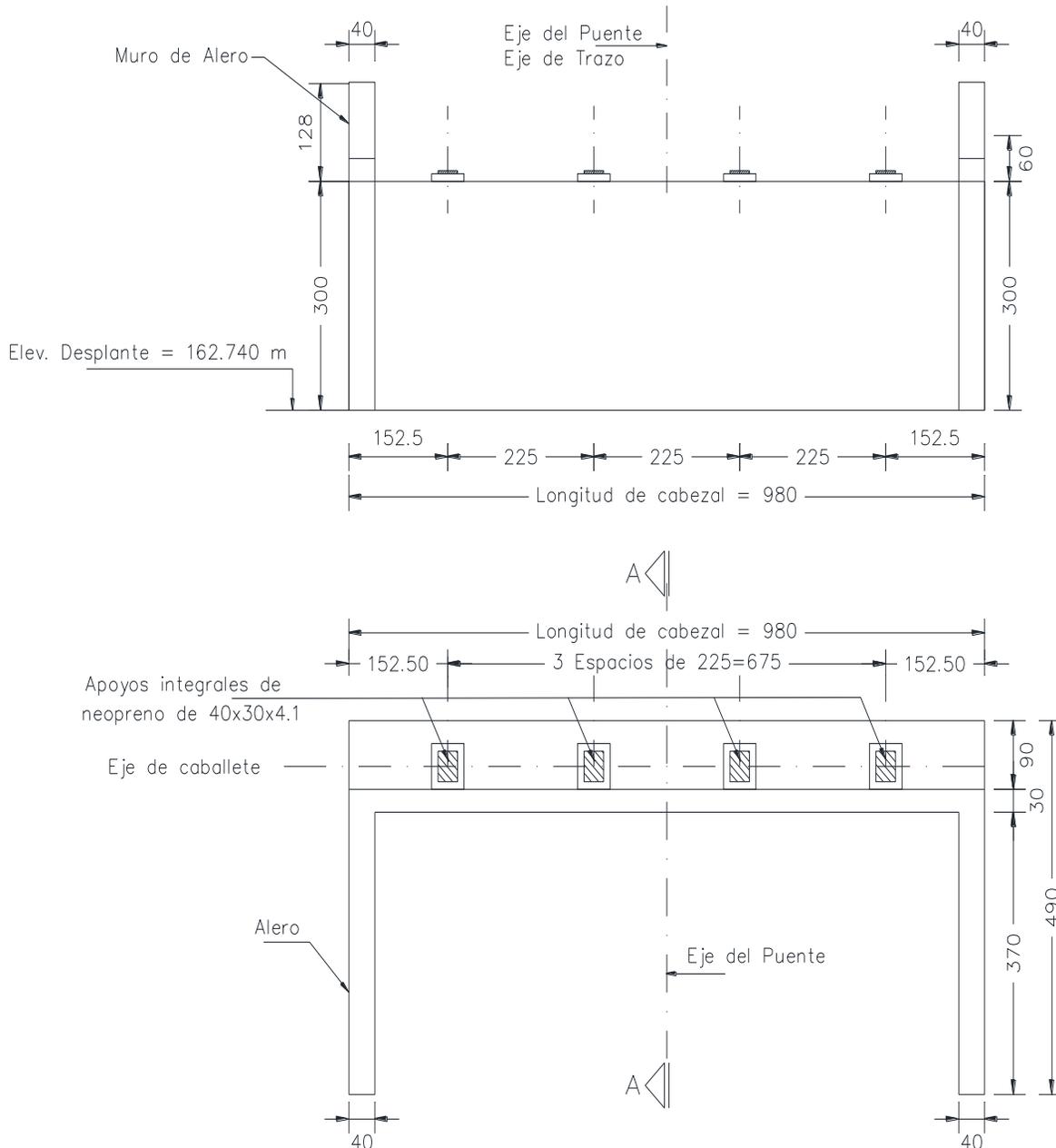


Figura 5.10 Vista frontal y vista en planta de caballetes No. 1 y 5.

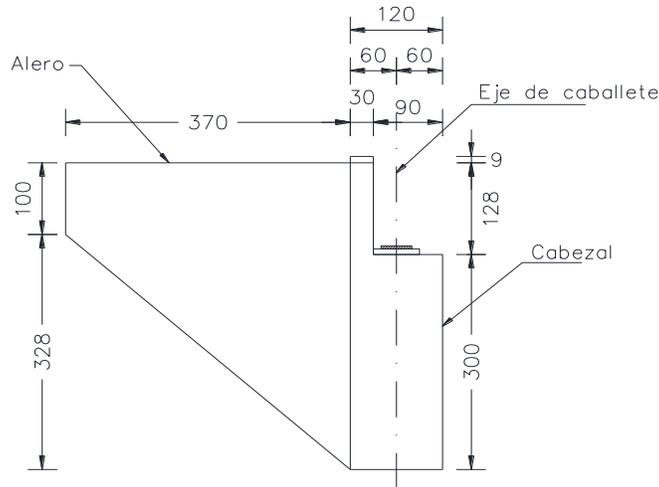


Figura 5.11 Corte A – A' de caballetes No. 1 y 5.

Los caballetes están formados como se muestra en las imágenes por: un cabezal, un muro de respaldo, aleros y bancos de nivel. Los bancos de nivel tienen las dimensiones de (0.5 m x 0.6 m x 0.1 m).

Para la construcción de los caballetes se realizó el armado de acero de refuerzo con un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ de cada una de las partes que lo componían; asimismo se colocó cimbra de madera para posteriormente colar el concreto de $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$. El concreto se vibró para que se esparciera correctamente dentro de la cimbra, cuidando que no se segregara.



Figura 5.12 Colado del caballete No. 1.

Las pilas o columnas del puente se construyeron con forma elíptica de sección hueca. Fueron de sección hueca debido a que son mucho más eficientes que las columnas macizas, dado que la capacidad a flexocompresión de una columna

depende, entre otros parámetros, de sus propiedades geométricas como el radio de giro y la longitud efectiva, dicho en otras palabras la relación de esbeltez.

$$\frac{k \times l}{r} \dots \dots \dots \text{relación de esbeltez}$$

Donde:

$k =$ factor de longitud efectiva que depende del nivel de restricción lateral en los extremos de la columna

$l =$ longitud libre de la columna

$r =$ radio de giro

El radio de giro es igual a la raíz cuadrada del momento de inercia entre el área, siendo éste mucho mayor en una columna hueca que en una columna maciza de la misma sección, debido a que el área bruta de la columna hueca es menor y el momento de inercia casi se conserva igual, aumentando el radio de giro. Esto provoca a su vez que la relación de esbeltez disminuya, haciendo que la capacidad a flexocompresión de la columna se eleve.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_t}} \dots \dots \dots \text{radio de giro}$$

Donde:

$I =$ momento de inercia

$A_t =$ área bruta de la sección transversal de la columna

Además de que son más eficientes las pilas huecas también se ahorran cantidades importantes de acero y de concreto.

Se muestra en la siguiente imagen la sección de las pilas No. 2, 3 y 4. Las dimensiones están en centímetros.

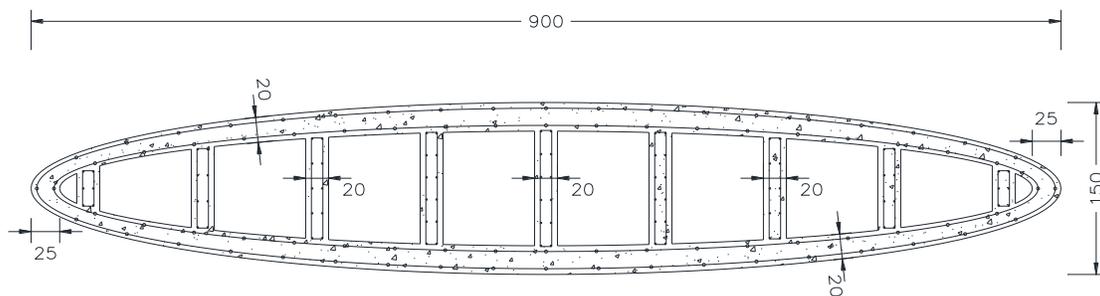


Figura 5.13 Sección de pilas No. 2, 3 y 4.

El problema que tienen las columnas huecas es que se producen pandeos locales, por esta razón se tuvieron que rigidizar internamente mediante diafragmas horizontales para evitarlo como se puede apreciar en la figura anterior, pero conservando la esencia y filosofía de una columna hueca.

Cabe mencionar que el armado de la pila No. 4 con respecto a las otras dos fue distinto. Asimismo la altura tampoco fue la misma, pues las pilas No. 2 y 3 tuvieron una altura de 11.40 m; mientras que la pila No. 4 fue más pequeña teniendo una altura de 7.50 m.

En las siguientes figuras se muestra la subestructura de los apoyos No. 2, 3 y 4, tal como fueron construidos.

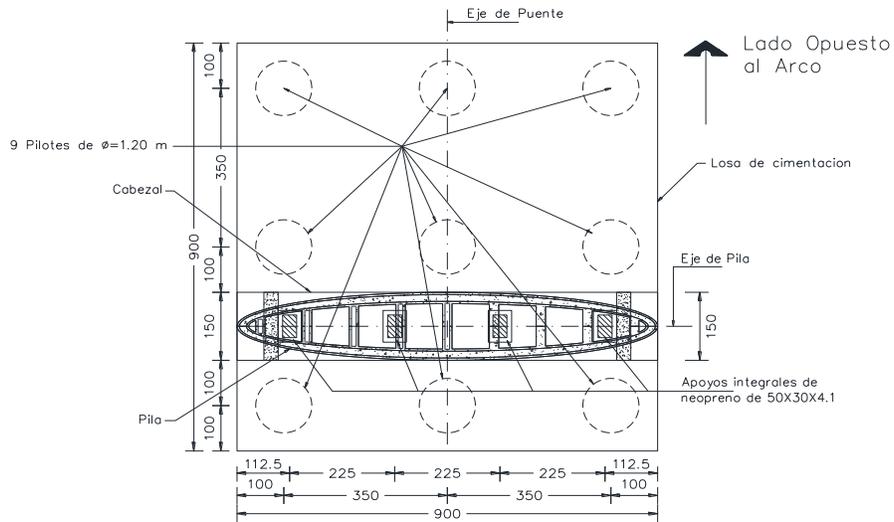


Figura 5.14 Vista en planta de pilas No. 2 y 3.

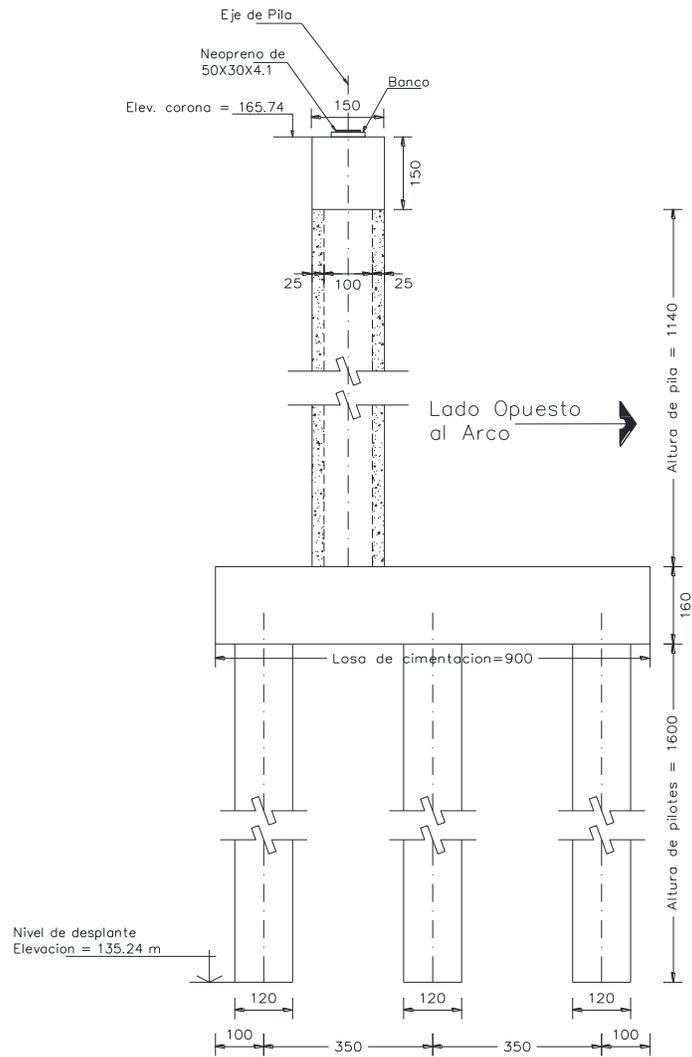


Figura 5.15 Vista Longitudinal de pilas No. 2 y 3.

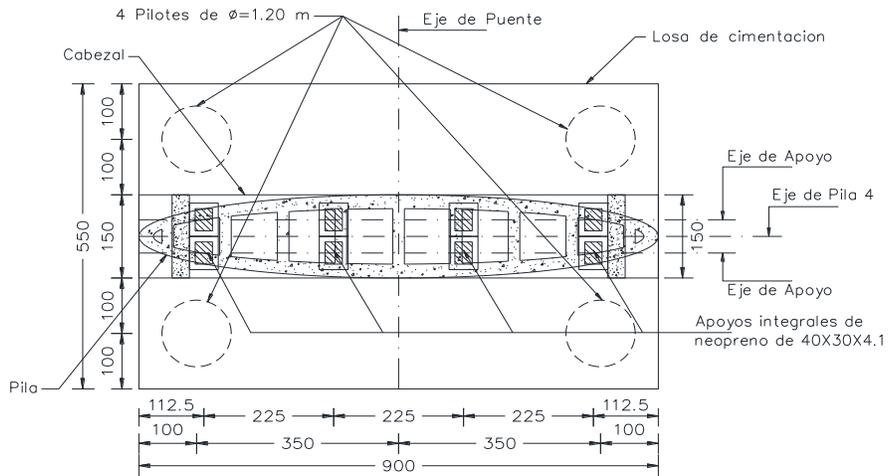


Figura 5.16 Vista en planta de pila No. 4.

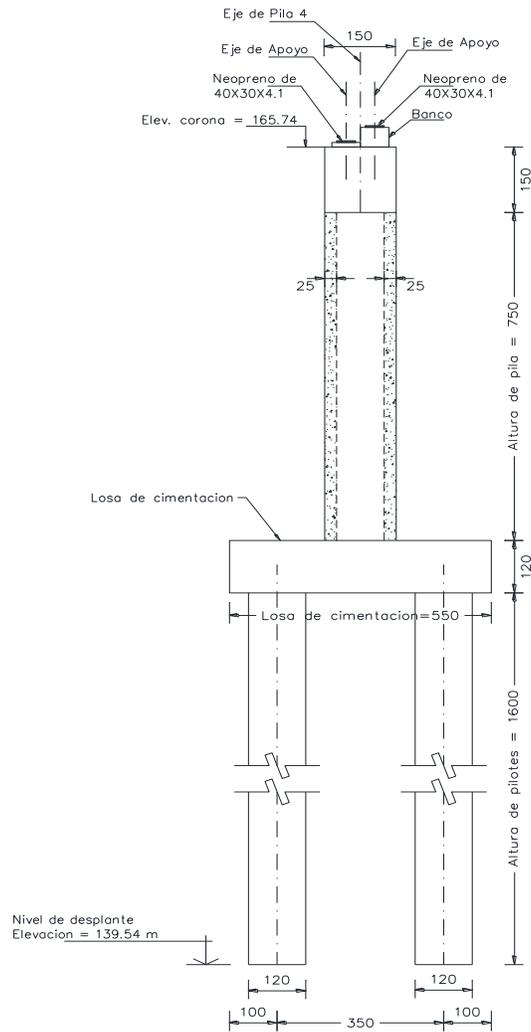


Figura 5.17 Vista longitudinal de pila No. 4.

Para lograr la sección requerida de las pilas se utilizó cimbra metálica deslizante en el exterior. En el interior se utilizó hule espuma de poliestireno (nieve seca), el cual quedó como cimbra pérdida. El colado de las pilas tuvo que realizarse en varias etapas por el tipo de sección. Se hacía un colado diario lo cual dejó juntas constructivas del orden de 60 cm. Previo a colar la siguiente parte de la pila se tenía que escarificar el concreto ya endurecido y a su vez aplicar un aditivo con propiedades adhesivas para que se tuviera una mejor unión con el concreto fresco. Se utilizó un concreto con resistencia a la compresión $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$. El acero de las pilas con un esfuerzo de fluencia $f_y= 4200 \text{ kg/cm}^2$, se fue armando conforme se iba avanzando en la construcción de las pilas.



Figura 5.18 Procedimiento constructivo de las pilas (pila No. 2).

La cimbra metálica fue fabricada en cuatro partes simétricas la cual se atornillaba para unirla, y para realizar el siguiente colado se aflojaba de sus tuercas para poder despegarla. Para subirla se utilizaron cadenas que pasaban a través de unas orejas en el extremo de la cimbra, y que a su vez se sujetaban del armado de la pila para que la cimbra fuera ascendiendo mientras éstas se iban jalando.



Figura 5.19 Trabajadores colocando la cimbra para el siguiente colado (pila No. 2).

Para que pudieran trabajar los obreros se tuvieron que colocar andamios de madera sobre la cimbra deslizante, los cuales estaban apoyados en unas escuadras de metal (ménsulas) que se fijaron en los extremos de la cimbra, y por ello subían a la par.



Figura 5.20 Trabajadores continuando con la elaboración del armado sobre el andamio (pila No. 3).

Una tercera parte del concreto de la revolvedora era vaciado a una carretilla tipo buggy, la cual era subida al andamio con ayuda de un camión grúa que contaba con un gancho. Una vez que el buggy estaba arriba de los tabloncillos de madera, los trabajadores procedían a colocar el concreto dentro de la cimbra de la pila, volteando el buggy y también ayudándose con palas.

A continuación se muestran unas imágenes donde se puede observar la realización de actividades simultáneas en los apoyos del puente para cumplir con el tiempo pactado en el contrato.



Figura 5.21 Avances simultáneos en la construcción de la subestructura del puente.

Una vez terminadas las pilas se continuó con la construcción de los cabezales, los cuales tuvieron las dimensiones de (9.0 m x 1.5 m x 1.5 m). También se construyeron los bancos de nivel. Los de las pilas No. 2 y 3 con dimensiones de (0.5 m x 0.7 m x 0.1 m). Mientras que en la pila No. 4 se construyeron dos tipos de bancos, pues como se ve en la figura 5.17, se tienen dos ejes de apoyo distintos para desplantar las traveses de la superestructura. En la siguiente figura se muestra la vista en elevación de estos bancos. Las dimensiones están en centímetros.

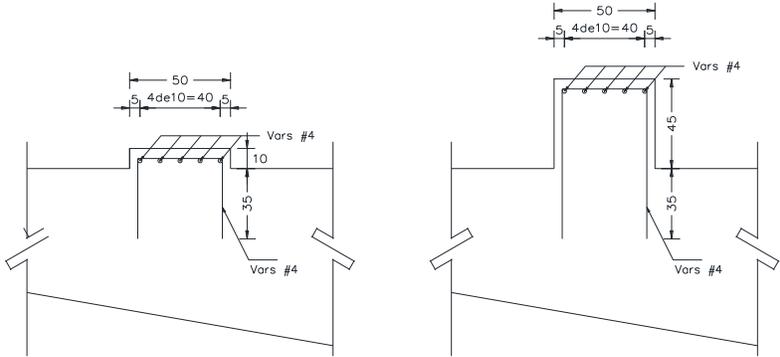


Figura 5.22 Vista en elevación de los bancos de nivel de la pila No. 4, con sus respectivos armados para unirse al cabezal.

Las dimensiones en planta de los dos diferentes bancos de nivel fueron de (0.5 m x 0.6 m); sin embargo, el banco más cercano a la pila No. 3 tuvo una altura menor que el banco más cercano al caballete No. 5. Se unieron al cabezal por medio del armado de acero de refuerzo. Se utilizó cimbra de madera para el posterior colado del concreto. El concreto utilizado tuvo una resistencia de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, mientras que el acero utilizado tuvo un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.



Figura 5.23 En la parte izquierda de la imagen se puede observar la cimbra utilizada para construir los bancos de apoyo de diferentes alturas.

En la siguiente figura se puede observar la vista frontal del cabezal, las pilas y los bancos de nivel. Las dimensiones están en centímetros.

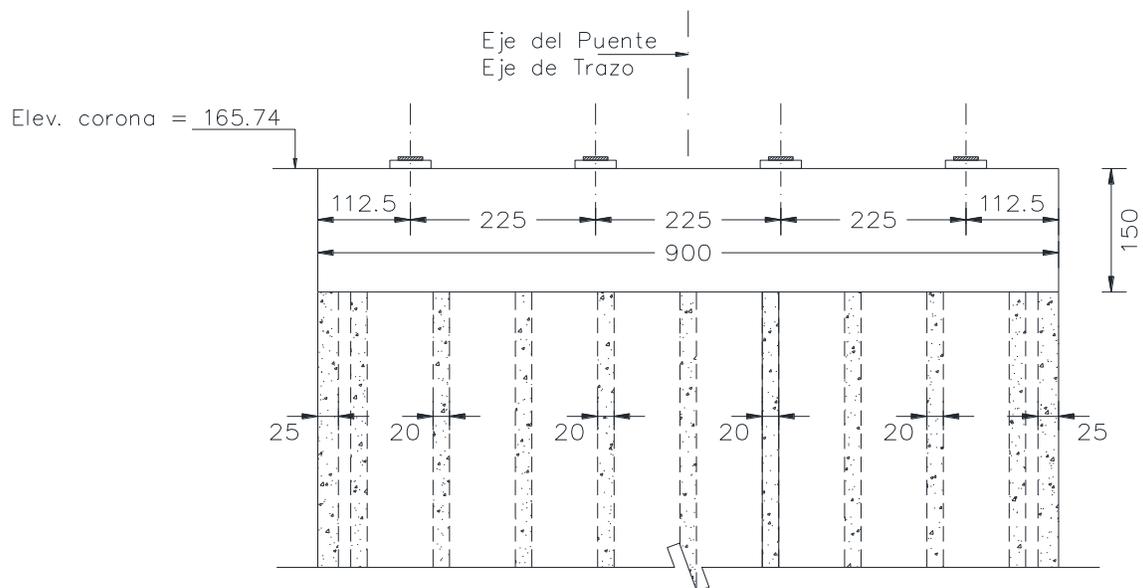
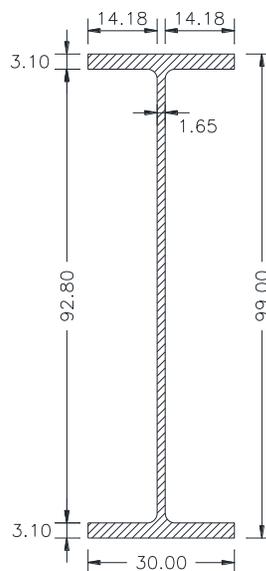


Figura 5.24 Vista frontal de los apoyos No. 2, 3 y 4.

5.4.2 Superestructura

La primera actividad realizada durante la construcción de la superestructura fue colocar los apoyos integrales de neopreno sobre los bancos de nivel. En los caballetes y en la pila No. 4 con dimensiones de (40 x 30 x 4.1) cm. Y en las pilas No. 2 y 3 con dimensiones de (50 x 30 x 4.1) cm. Fue una acción simple debido a que no pesan mucho, por lo tanto una persona puede cargarlos fácilmente y colocarlos en su lugar.

Una vez estando en su lugar, continuó el procedimiento constructivo con la colocación de las traveses de acero A-992. En el tramo de 1 – 4 se utilizó una viga IPR con las siguientes dimensiones. Las dimensiones están en centímetros.

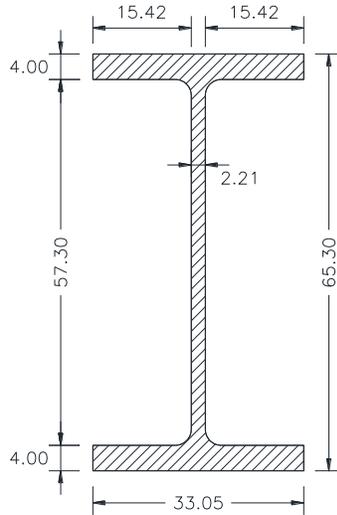


VIGA LONGITUDINAL
IPR 40"x272.70 kg/m

Figura 5.25 Vista transversal de la viga longitudinal en el tramo 1 – 4.

La longitud total de la viga en este tramo fue de 95.0 m de largo, la cual abarcó desde el banco de apoyo del caballete No. 1 hasta el primer banco de apoyo de la pila No. 4. Sin embargo, por su gran longitud se tuvo que fraccionar en dos tramos de 20.0 m y un tramo de 55.0 m para facilitar su montaje.

Para el tramo 4 – 5 las características de la viga IPR utilizada fueron las siguientes. Las dimensiones están en centímetros.



VIGA LONGITUDINAL
IPR 24"x308.40 kg/m

Figura 5.26 Vista transversal de la viga longitudinal en el tramo 4 – 5.

La longitud total de esta viga en dicho tramo fue de 15.0 m de largo, la cual fue desplantada sobre el segundo banco de apoyo de la pila No. 4 y sobre el banco de apoyo del caballete No. 5.

Asimismo hubo la necesidad de construir los diafragmas a base de placas y ángulos de acero A-36, para transmitir los esfuerzos producidos por las cargas de los vehículos que circularían sobre el puente, repartiéndolos a las traveses metálicas, y éstas a su vez transmitiendo los esfuerzos a los apoyos. En las siguientes figuras se muestra la disposición final de dichos elementos en ambos tipos de traveses.

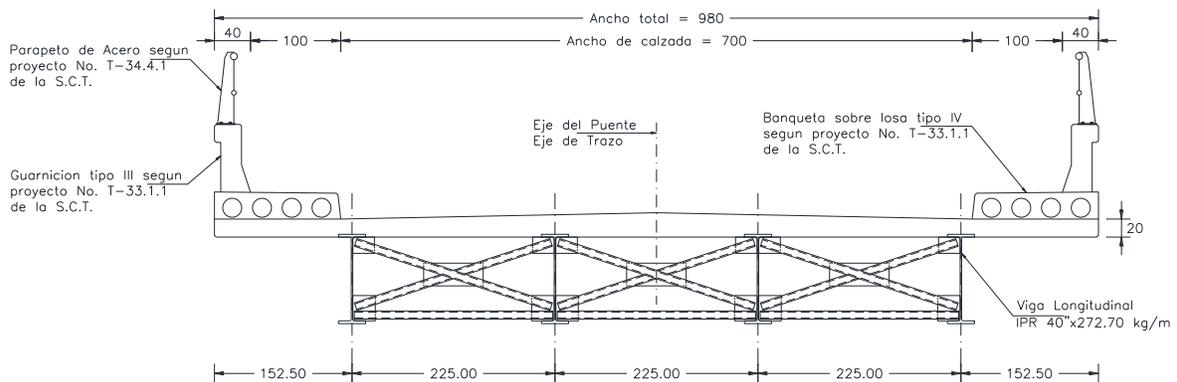


Figura 5.27 Sección transversal de contraenteo en vigas IPR 40"x272.70 kg/m (diafragma).

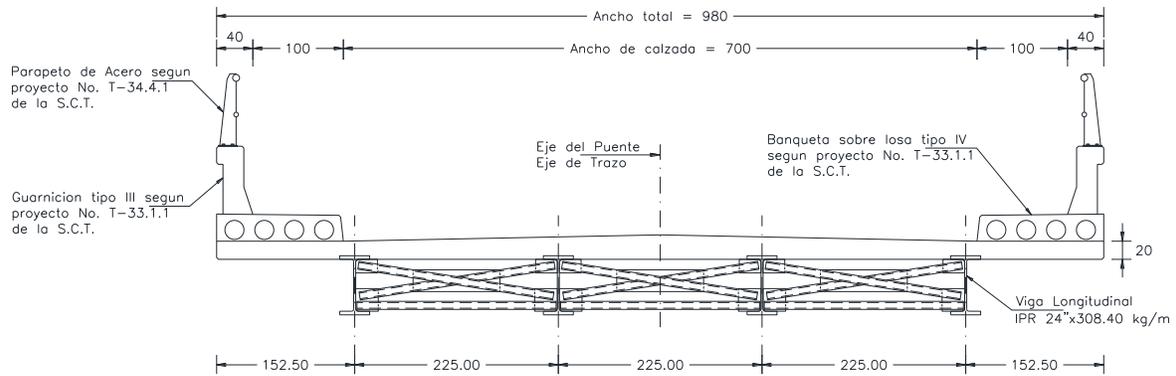


Figura 5.28 Sección transversal de contraenteo en vigas IPR 24"x308.40 kg/m (diafragma).

En total se montaron 4 vigas entre cada apoyo del puente como se puede apreciar en las figuras.

Los perfiles de acero fueron transportados al lugar de la obra sobre tráilers, sin embargo, hubo que tomar las debidas precauciones, ya que no era un camino de fácil acceso y había curvas cerradas. Las traveses de la superestructura fueron transportadas con longitud comercial de 12.0 m, mientras que las dovelas del arco tuvieron un diseño especial. Una vez en campo las vigas fueron colocadas en un patio de almacenaje para su posterior montaje.



Figura 5.29 Patio de almacenaje de vigas y dovelas del arco.

Ahí mismo se soldaron los conectores a cortante en la parte superior de las traveses, y también se soldaron las placas para colocar el contraventeo.



Figura 5.30 Trabe con conectores a cortante y placas para colocar el contraventeo.

Se utilizó la técnica conocida como “Sandblast” que consiste en lanzar arena a presión, con el objetivo de quitar la poca oxidación que tenían las traveses y limpiarlas. Después de ello se les aplicó un primer RP-4 especificación de Pemex para protegerlas contra los efectos de la corrosión, el cual las pintó de un color rojizo y con ello se podía saber en qué parte del tratamiento se encontraban las traveses.

El montaje de este tipo de elementos es una de las etapas más críticas en un proyecto, es por ello que hay que tener especial cuidado, pues con un pequeño descuido se puede provocar un accidente desastroso.

La colocación de las traveses comenzó por el tramo 4 – 5, las traveses de este tramo tenían una longitud de 15.0 m y fueron montadas con ayuda de un sistema a base poleas y tirfor. Cada viga tenía un peso igual a 4.7 ton aproximadamente y se fue montando de una en una. Una vez listas se soldó el contraventeo de las mismas. Posteriormente se coló la losa de concreto con ayuda de una cimbra de madera.

Alcanzada cierta resistencia del concreto siguió el montaje de vigas del tramo 3 – 4 con una longitud de 20.0 m cada una, y con un peso aproximado de 5.5 ton. Las maniobras fueron realizadas de la misma forma que en el tramo anterior. Cuando las cuatro traveses estuvieron en su posición final se procedió a soldar el contraventeo. De igual manera se colocó cimbra de madera para colar la losa de concreto.

El procedimiento constructivo de la superestructura continuó con el montaje de las vigas del tramo 2 – 3, el cual fue un verdadero reto, pues cada viga tenía una longitud de 55.0 m y un peso aproximado de 15.0 toneladas. Es por ello que se soldaron encima de las losas construidas, transportándolas ahí con un camión grúa al igual que las vigas ya colocadas.

Estas traveses centrales también fueron lanzadas a mano. Las poleas utilizadas fueron diseñadas especialmente (de menor peso) para que a través del uso de una serie de tirfor y cables guía se pudieran lanzar y colocar dichas traveses en su posición final. Los tirfor que se utilizaron para jalar las traveses tenían por sí solos una capacidad de 3.5 toneladas, y con el grupo de poleas empleado y los cables la capacidad de cada punto de apoyo fue de 20.0 toneladas.

Para tener estabilidad durante el proceso dada la longitud de estos elementos, se decidió lanzar las vigas en pares, las cuales fueron unidas mediante los respectivos diafragmas, con un peso aproximado en conjunto de 38.0 toneladas. Fueron sujetadas de cuatro puntos, teniendo una capacidad con el sistema de poleas implementado de 80.0 toneladas aproximadamente. Como se tenían que montar cuatro vigas se lanzaron en dos pares.



Figura 5.31 Lanzado del segundo par de traveses centrales.

El uso de poleas permitió multiplicar la capacidad del sistema, el cual fue colocado sobre la pila No. 2 y sujetado con grilletes. Se diseñaron para que fueran lo más ligeras posibles y fuera factible cargarlas a mano.



Figura 5.32 Sistema de poleas diseñado con un menor peso para que fuera factible cargarlas (vista frontal y posterior).

Se utilizaron cuatro tirfor en total (aparatos elevadores manuales a cable pasante), y se tenían otros cuatro de repuesto, por si los que se estaban usando se barrían se pudieran cambiar rápidamente. Las maniobras se realizaron con palancas para tirar de los cables y poder jalar las traves.

Estos aparatos se colocaron cercanos al caballete No. 1, y los cables empleados se sujetaron a éste como se muestra en la imagen.



Figura 5.33 Trabajadores accionando el mecanismo para jalar las traves.

En la parte trasera, las vigas fueron sujetadas al caballete No. 5, y de igual forma se utilizó un juego de poleas y tirfor para controlar el avance y evitar que se desestabilizaran las vigas, aflojando los cables conforme se iba avanzando con el montaje.



Figura 5.34 El par de traves estaba sujeto también en el otro extremo.

Fue necesario implementar un pequeño sistema en la pila No. 3 donde se pudieran desplazar las vigas mientras eran lanzadas, de forma que no se arrastraran, y así no se lastimara ni la losa ni las traves, el cual consistió en colocar un rodillo que girara mientras permitía el avance de las vigas metálicas.



Figura 5.35 Rodillo que permitió el avance de las traves sin que se lastimaran los elementos.

En esta otra imagen se puede observar el procedimiento de montaje desde otra perspectiva.



Figura 5.36 Montaje de las traves centrales visto desde otro ángulo.

Todo el procedimiento de montaje se realizó cuidadosamente hasta que finalmente se cubrió todo el claro.



Figura 5.37 Montaje en su etapa final (visto desde la parte posterior).

Los cables guía fueron muy importantes para dirigir a las travesaños durante el montaje, así como para tener estabilidad durante el procedimiento y evitar que hubiera un percance.



Figura 5.38 Par de travesaños llegando al punto de apoyo de la pila No. 2, se observan los cables guía debajo de las mismas.

Cada par de travesaños se montó en una mañana por la experiencia que tenía el contratista en este tipo de procedimiento. Cuando los dos pares estuvieron en su posición final se terminó de soldar el contraventeo restante, ya que sólo se había soldado una parte del mismo para que fuera posible lanzarlas.

Posteriormente se montaron las travesaños del último claro, con una longitud de 20.0 m cada una y un peso aproximado de 5.5 toneladas. Sin embargo en este tramo se volvieron a montar de una viga a la vez, con ayuda de una sola pluma con poleas y un solo tirfor, siendo sujetadas de un único punto de apoyo como en los primeros lanzamientos, pues se tenía la suficiente capacidad con ello (20 toneladas). También se sujetaron de la parte trasera para controlar el avance y no se requirió utilizar cables guía. Se contraventearon como en los otros casos y se construyó la losa de concreto.

Simultáneo al montaje de las travesaños centrales comenzó la construcción del arco del puente en este mismo tramo. Se construyó precisamente en esa posición para librar el río Claro, además, no es un río de velocidades altas, y por ello no preocupó que el río atravesara el arco pues no se corría peligro de la formación de una gran represa. En las siguientes figuras se puede visualizar el arco tanto en elevación como en planta con sus respectivas dimensiones. Las dimensiones están en centímetros.

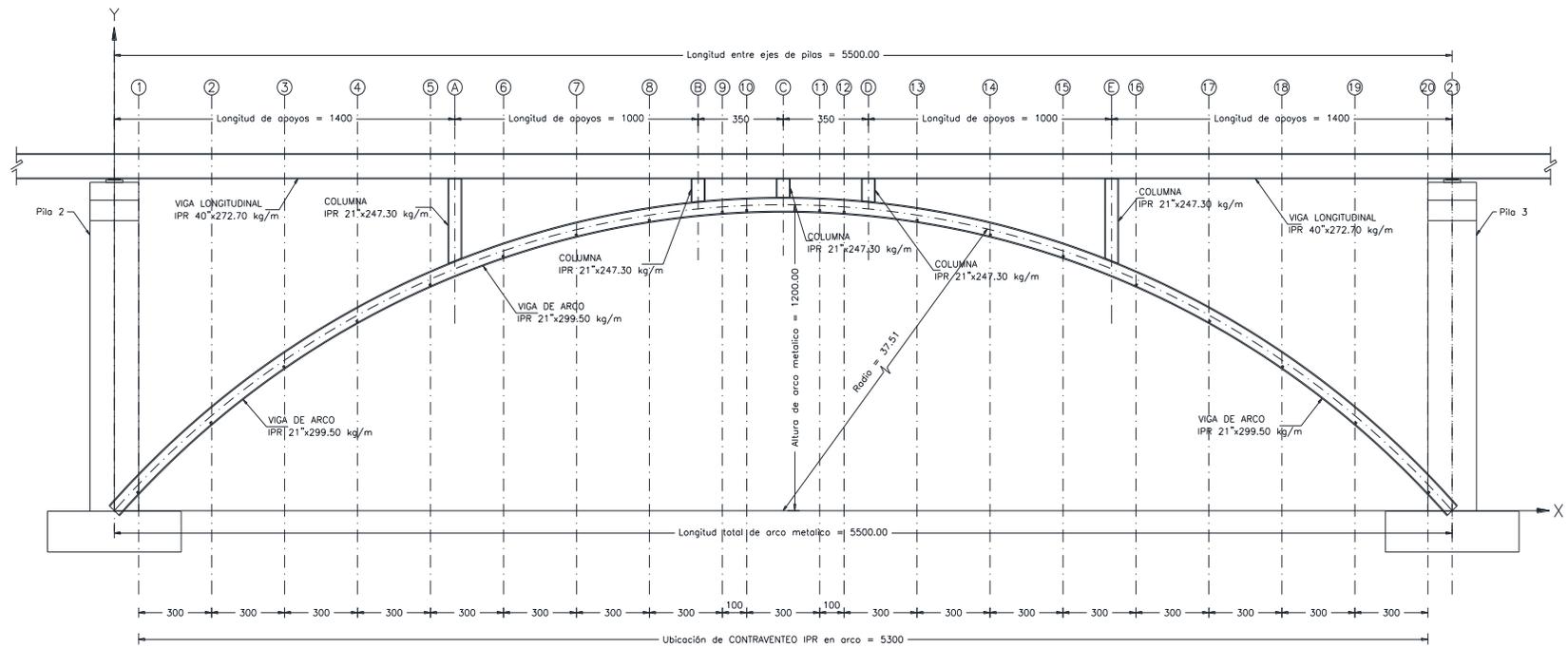


Figura 5.39 Elevación de contraviento IPR de arco metálico.

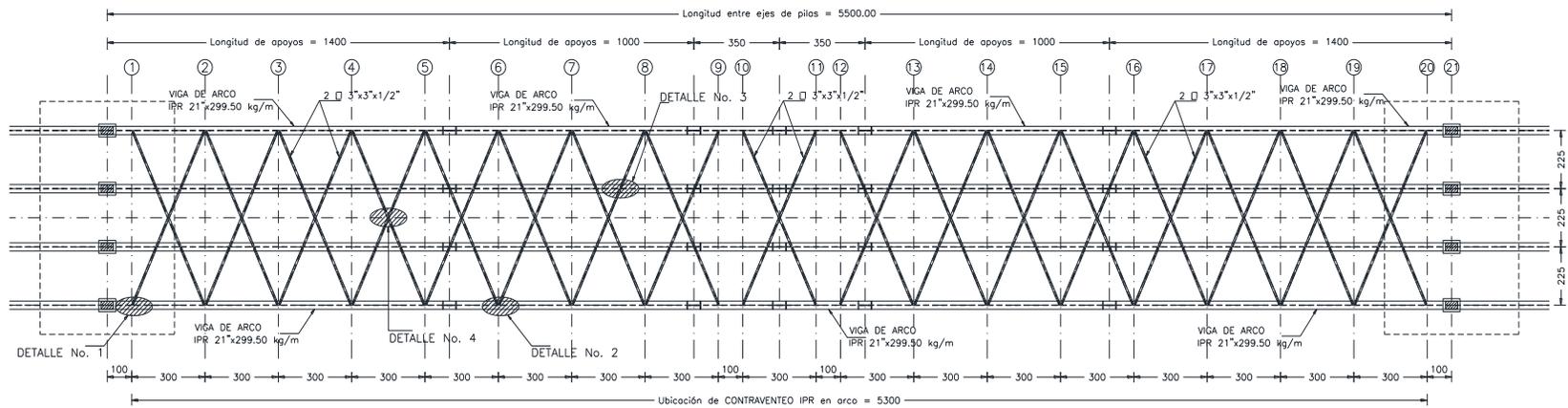


Figura 5.40 Planta de contraviento IPR de arco metálico.

Como se puede ver en las imágenes anteriores, el arco se alojó entre las pilas No. 2 y 3, teniendo una longitud total de 55.0 m y una altura de 12.0 m. El contraventeo del arco fue a base de ángulos y placas de acero estructural A-36 soldados a las vigas IPR del arco. Estos elementos constructivos rigidizan la estructura y distribuyen los esfuerzos producidos por los diferentes tipos de carga. Su construcción comenzó después de un metro del eje de las pilas, teniendo entonces una longitud de 53.0 m. Se repitieron cada tres metros y sólo existió una interrupción, pues el contraventeo central con respecto a los otros se separó un metro de cada lado como se aprecia en la figura anterior.

En la siguiente tabla se resume la geometría del arco, desde el punto de origen, con sus respectivas coordenadas y la distancia a partir de dicho punto.

Tabla 5.5 Geometría del arco.

| GEOMETRIA DE ARCO | | | |
|-------------------|-------------|--------|--------------|
| PUNTO | COORDENADAS | | DIST. (m) |
| | X | Y | |
| ORIGEN | 0.000 | 0.000 | |
| EJE-1 | 1.000 | 1.037 | 1.441 |
| EJE-2 | 4.000 | 3.726 | 4.029 |
| EJE-3 | 7.000 | 5.903 | 3.706 |
| EJE-4 | 10.000 | 7.668 | 3.481 |
| EJE-5 | 13.000 | 9.084 | 3.318 |
| EJE-6 | 16.000 | 10.194 | 3.199 |
| EJE-7 | 19.000 | 11.024 | 3.113 |
| EJE-8 | 22.000 | 11.595 | 3.054 |
| EJE-9 | 25.000 | 11.917 | 3.017 |
| EJE-10 | 26.000 | 11.970 | 1.001 |
| EJE-C | 27.500 | 12.000 | 1.500 |
| EJE-11 | 29.000 | 11.970 | 1.500 |
| EJE-12 | 30.000 | 11.917 | 1.001 |
| EJE-13 | 33.000 | 11.595 | 3.017 |
| EJE-14 | 36.000 | 11.024 | 3.054 |
| EJE-15 | 39.000 | 10.194 | 3.113 |
| EJE-16 | 42.000 | 9.084 | 3.199 |
| EJE-17 | 45.000 | 7.668 | 3.318 |
| EJE-18 | 48.000 | 5.903 | 3.481 |
| EJE-19 | 51.000 | 3.726 | 3.706 |
| EJE-20 | 54.000 | 1.037 | 4.029 |
| EJE-21 | 55.000 | 0.000 | 1.441 |

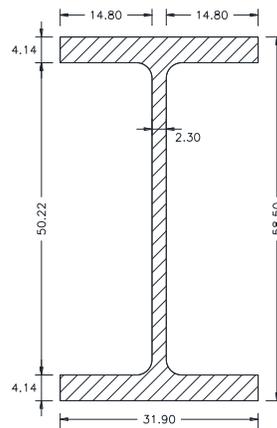
El arco al igual que las traveses fue de estructura metálica de acero A-992. Se prefabricó en dovelas y se transportaron al lugar colocándolas sobre polines de madera con ayuda de un camión grúa.



Figura 5.41 Dovelas del arco en sitio.

Fue necesario darles un tratamiento para evitar el efecto de la corrosión al igual que con las traveses, primeramente limpiándolas con un chorro abrasivo de arena o mejor conocido como “Sandblast”, y posteriormente se les aplicó un primer RP-4 con especificación de Pemex de color rojizo. Con un aparato magnético se midió el espesor mínimo que debía tener la pintura.

Las vigas utilizadas para la construcción del arco fueron numeradas para tener un control y un orden a la hora de proceder con la colocación de las mismas, teniendo las siguientes dimensiones. Las dimensiones están en centímetros.



VIGA EN ARCO
IPR 21"x299.50 kg/m

Figura 5.42 Viga en arco IPR 21"x299.50 kg/m.

Para dar inicio a la construcción del arco y dado a que éste debía ser empotrado, fue necesario construir una estructura de concreto, con la finalidad de ahogar dentro de ésta las vigas iniciales del arco. Estas vigas fueron lo suficientemente largas para que alcanzaran a sobresalir del concreto, y así poder soldar los

elementos siguientes. Este colado de concreto se realizó durante la construcción de la subestructura, y se construyó arriba de las zapatas del lado donde comenzaba el arco.



Figura 5.43 Arranque del arco, empotrado a la estructura de concreto (pila No. 2).

Para colocar las demás dovelas del arco primeramente se tuvieron que acercar a un lado de donde serían montadas, las cuales fueron transportadas a partir del patio de almacenaje con ayuda de un camión grúa.

El montaje de estos elementos no fue fácil, ya que se izaba de una dovela a la vez mediante diferenciales de cadena que la sujetaban a las traveses centrales de la superestructura, las cuales funcionaron como grúas viajeras. Las dovelas tenían soldados unos anillos en la parte superior para poder sujetarlas a partir de esos puntos.



Figura 5.44 Primeras dovelas montadas (pila No. 3).

Los trabajadores maniobraron dichos elementos cuidadosamente, levantándolos y colocándolos en su posición para ser soldados y ensamblados a las dovelas del tramo anterior. Únicamente en el primer ensamblaje se requirió del camión grúa porque aún no habían sido terminadas de montar las vigas centrales de la superestructura, a partir de las cuales se sujetaron las demás dovelas del arco.

En los primeros tramos también fue necesario sujetarlas a todo lo ancho con un elemento estructural provisional para mantenerlas fijas, que fue colocado de manera temporal previo a soldar el arriostramiento, e inclusive se colocó una especie de andamios para soportar el peso de las dovelas.

Haciendo uso de una estación total equipada con láser se corroboró el alineamiento de los elementos.

La construcción del arco arrancó a partir de sus extremos, avanzando simétricamente hasta coincidir en el tramo central. En las siguientes imágenes se puede visualizar este proceso.



Figura 5.45 Montaje del segundo tramo del arco, se pueden observar los puntos a partir de los cuales se sujetaron las vigas del arco.

Conforme se montaban las cuatro vigas de cada tramo los soldadores unían estos elementos a través del contraventeo tanto superior como inferior, para tener una mayor rigidez y distribuir los esfuerzos.

Los cuatro arcos no fueron hechos al mismo tiempo. Sólo en los primeros tramos se colocaron las cuatro dovelas del arco en conjunto, antes de comenzar con el montaje de las siguientes. Primeramente se terminaron de montar y unir los dos arcos centrales para posteriormente finalizar con el ensamblaje de los arcos de los

extremos, con el motivo de que el arco en conjunto comenzará a tener rigidez y por seguridad del procedimiento.

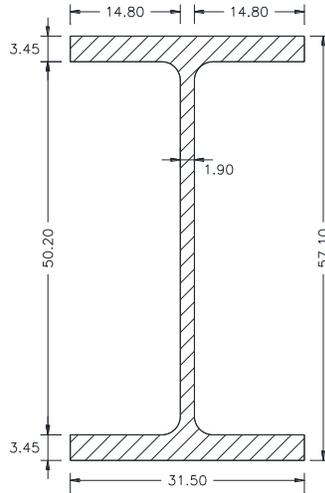


Figura 5.46 Procedimiento constructivo del arco visto en toda su longitud.

La construcción de todo el arco concluyó una vez que se terminó de ensamblar el último tramo y se soldó su diafragma superior e inferior.

El procedimiento constructivo continuó con el contrarrestado del flechado en las traveses centrales de la superestructura, que se había generado al lanzarlas con un claro tan largo y haberlas utilizado como grúas viajeras. Estas traveses habían sido calculadas para que inclusive flechadas pudieran cargar las dovelas del arco. Para revertir ese efecto se requirió del uso de gatos hidráulicos que se desplantaron en unas ménsulas metálicas fijadas al arco. Una vez en posición se levantaron las traveses con un total de ocho gatos hidráulicos, y con ayuda de la estación total equipada con láser se corroboró que se tuviera la contraflecha correcta.

Aprovechando esta acción se colocaron en posición los atizadores, los cuales tienen como función estructural el transmitir la carga de la superestructura al arco. Se montaron en los ejes A, B, C, D y E como se ve en la figura 5.39. La viga utilizada para estos atizadores fue de acero A-992 y tiene las siguientes dimensiones. Las dimensiones están en centímetros.



COLUMNA
IPR 21"x247.30 kg/m

Figura 5.47 Vista transversal de columna o atizador en arco IPR 21"x247.30 kg/m.

Se tuvieron tres diferentes longitudes de columnas. Las del eje A y E con longitud igual a 3.22 m, las del eje B y D con longitud de 0.89 m, y las del eje C con una longitud de 0.73 m.



Figura 5.48 Ensamblado de atizadores del arco y colocación de cimbra de madera en el tramo central del puente.

En esta otra imagen se puede apreciar como se terminó de colocar la cimbra de madera para proceder con la construcción de la losa de concreto.



Figura 5.49 Cimbra de madera en el tramo central del puente lista para construir la losa de concreto.

En las imágenes anteriores se puede ver como se están realizando los trabajos finales en los atizadores del arco. También se observa cómo se fue colocando la cimbra de madera que se utilizó para poder terminar el colado de la losa de concreto. A su vez se puede apreciar el cambio de tono en la pintura de los perfiles de acero, de rojizo a un color anaranjado. Este acabado de pintura RP-6 especificación de Pemex se aplicó para cubrir los detalles que se presentaron al maniobrar los elementos, dar mayor protección a las vigas metálicas contra el efecto de la corrosión, y para dar un terminado final al puente.



Figura 5.50 Trabajos finales de soldado en los atizadores.

Los atizadores también llevaron un contraventeo vertical para distribuir eficientemente los esfuerzos, y en la siguiente imagen se pueden apreciar una vez terminados los trabajos.



Figura 5.51 Contraventeo vertical en los atizadores del arco una vez terminado el puente.

Terminada de colocar la cimbra de madera se procedió a realizar el armado de la parrilla de la losa de concreto, así como el armado de las banquetas, para posteriormente realizar el colado. El acero utilizado tuvo un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.



Figura 5.52 Armado de losa y banquetas listo para realizar el colado, asimismo se pueden visualizar los conectores a cortante y los drenes de pvc (ambos extremos de la losa central).

En la imagen izquierda se puede observar como unos obreros están emparejando con una regla parte del concreto que ya fue colado. Se utilizaron revolvedoras mecánicas para hacer el concreto con una resistencia $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, al cual se

le aplicó un aditivo reductor de agua para tener una mayor trabajabilidad del concreto así como resistencias considerables lo más pronto posible. Mediante carretillas tipo buggy se acarreó el concreto y una vez en posición se voltearon para vaciarlo. Se vibró para distribuirlo correctamente dentro de la cimbra evitando el segregado del concreto y se le dio el acabado final. Se tuvo que cuidar el proceso de curado para que no se presentaran agrietamientos.

Es importante hacer notar que para unir la losa de concreto a las traveses de acero y se pudieran transmitir los esfuerzos, ya estaban en posición los conectores a cortante antes de colar el concreto, de hecho se soldaron a las traveses previo a su montaje como se aprecia en la imagen 5.30.

También se requirió dejar ahogados drenes de pvc para desalojar el agua de lluvia, con un diámetro de 3.0 pulgadas y una longitud de 25.0 cm. Se colocaron longitudinalmente cada 3.0 metros como se muestra en las imágenes anteriores.

En ambos extremos del puente se observa como ya inclusive se había construido: parte de la banqueta, parte de la guarnición con sus parapetos, y los remates de parapeto. Se presentan a continuación las dimensiones de estos elementos en centímetros.

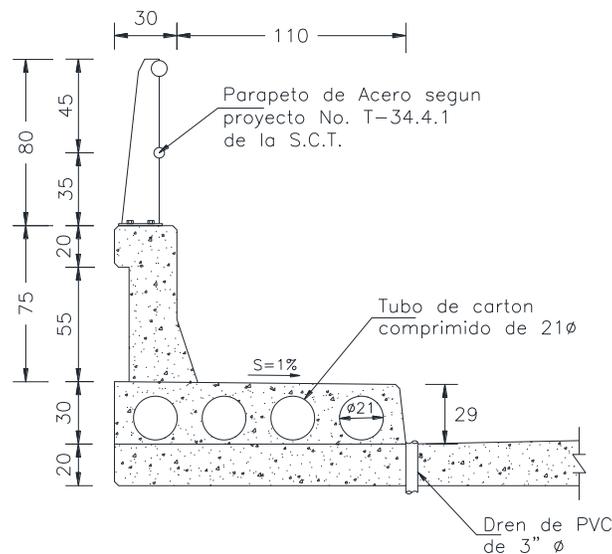


Figura 5.53 Geometría de banqueta.

Con el objetivo de aligerar las banquetas se decidió utilizar cartón comprimido, o en su caso hule espuma de poliestireno, para dejarlo como cimbra pérdida durante el colado de estos elementos. Para construir la guarnición se utilizó cimbra metálica deslizante.



Figura 5.54 Construcción de la guarnición.

Los parapetos fueron fabricados en sitio con tubos y placas de acero con las siguientes características. Las pilastras del parapeto fueron colocadas cada dos metros a lo largo del puente.

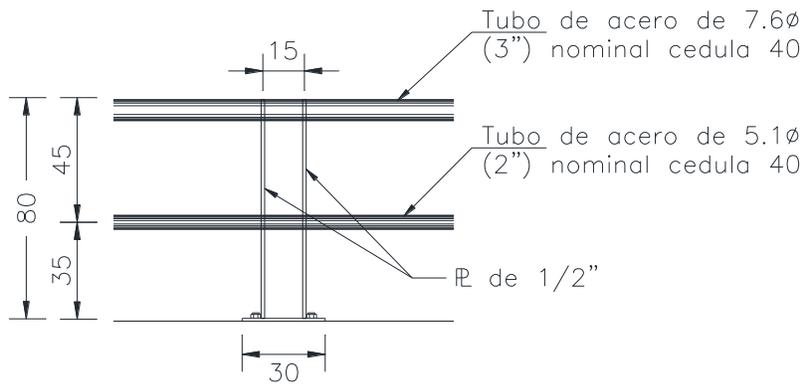


Figura 5.55 Parapeto en vista longitudinal.

Para construir el remate de parapeto se utilizó cimbra de madera, obteniendo así las dimensiones requeridas. Se presentan las dimensiones en centímetros.

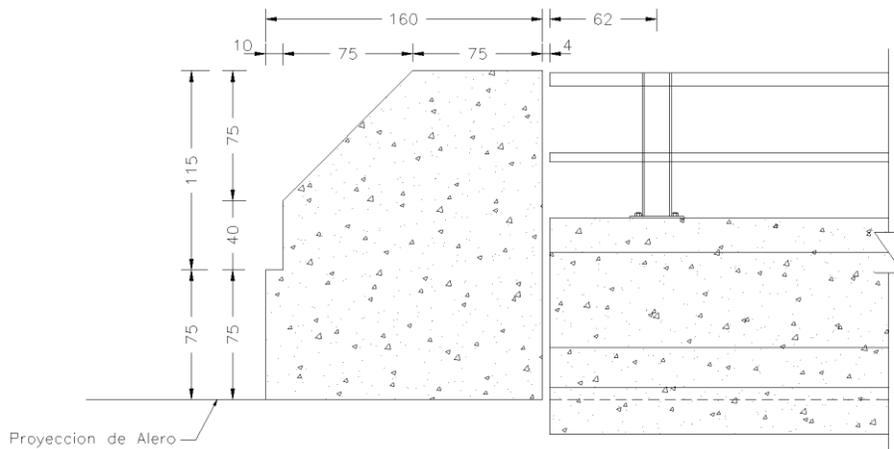


Figura 5.56 Geometría de remate de parapeto.

En la siguiente imagen se pueden apreciar ya construidos: el remate de parapeto, la banqueta, la guarnición y los parapetos en un extremo del puente.



Figura 5.57 Remate de parapeto, banqueta, guarnición y parapetos construidos.

También se tuvieron que dejar juntas constructivas a lo largo del puente. Estas juntas son muy importantes pues permiten el libre desplazamiento de la losa por efectos de temperatura para que no se presenten agrietamientos. Se dejaron únicamente tres juntas, una en el eje de cada caballete y otra en el eje de la pila No. 4. En las siguientes figuras se muestran los detalles para cada tipo de junta.

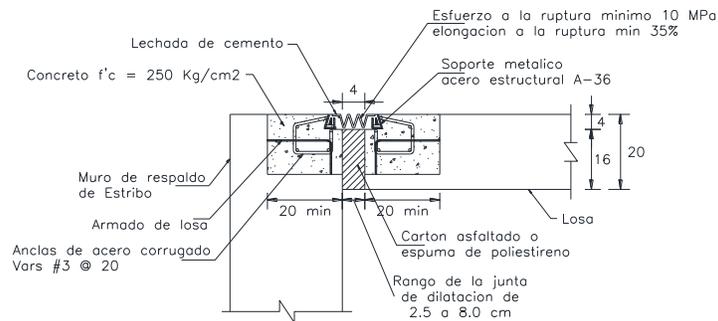


Figura 5.58 Detalle de junta de calzada tipo MEX-T-50 en caballete.

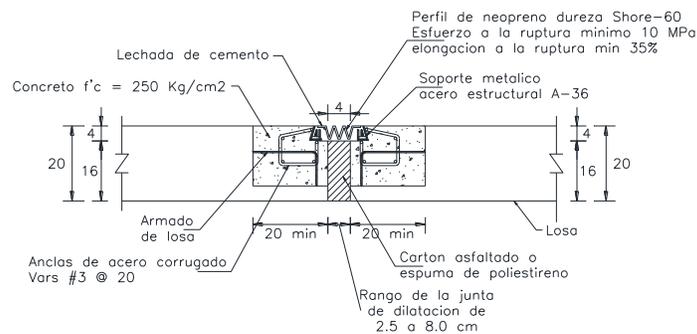


Figura 5.59 Detalle de junta de calzada tipo MEX-T-50 en pila.

Para colocarlas en su lugar se dejaron sin colar ciertas partes de la losa, lo cual se logró con cimbra de madera. Una vez endurecido el concreto de la losa se procedió a colocar las juntas a todo lo ancho del puente. Terminado ese trabajo se coló la parte restante de la losa, cuidando que no se ahogara completamente el perfil de neopreno, pues es el elemento que permite el desplazamiento de la estructura por efectos de temperatura.

Es importante que también se interrumpa el parapeto donde se dejó la junta, pues al no hacerlo se tendría un elemento rigidizante que no permitiría el libre movimiento.

Enseguida se muestra una imagen donde se puede apreciar el arco del puente una vez terminado.



Figura 5.60 Arco del puente una vez terminado.

5.4.3 Aproches

La construcción de los aproches del puente estuvo a cargo de la Junta Estatal de Caminos del Gobierno del Estado de San Luis Potosí, y no del contratista que estuvo a cargo de la construcción del puente. Generalmente los aproches son considerados con una longitud de 40.0 m a cada lado del puente, pero en este caso solamente se tuvo un mejoramiento geométrico en la entrada del puente correspondiente a 30.4 m lineales, y a la salida de sus terracerías de 15.2 m lineales.

Los trabajos de construcción de las terracerías consistieron en realizar cortes debajo de la subrasante, en rampas, en carriles de acceso hacia carriles centrales, y en compactar posteriormente la cama de dichos cortes de acuerdo al proyecto geométrico.

El cuerpo del pedraplén se construyó con los materiales obtenidos del banco elegido para terracerías con capas horizontales y de espesor adecuado al equipo de construcción, de manera que se lograra un acomodo satisfactorio. Esto se hizo mediante tres pasadas, por cada uno de los puntos que formaban la superficie de cada capa, con un tractor con peso de cuarenta y cinco toneladas, avanzando y retrocediendo la máquina con movimiento ronceado.

El cuerpo de terraplén se construyó con materiales obtenidos de banco y se compactó con rodillos al noventa y cinco por ciento (95%) de su peso volumétrico seco máximo (PVSM), mediante la prueba AASHTO estándar.

Una vez terminada la construcción del cuerpo del terraplén, se construyó la capa subrasante de treinta centímetros. La cual fue compactada al noventa y cinco por ciento (95%) de su PVSM, mediante la prueba AASHTO estándar.

Para dar por terminada la construcción de terracerías en el tramo de aproches del puente incluyendo su afinamiento, se verificó el alineamiento, el perfil y la sección de su forma, anchura y acabado, de acuerdo con lo fijado en el proyecto.

El pavimento de los aproches del puente únicamente consistió en la construcción de una base hidráulica de 20 centímetros de espesor, compactada al cien por ciento (100%) de su PVSM de la prueba AASHTO modificada. Y en la construcción de una losa de concreto, tratándose por lo tanto de un pavimento rígido.

Finalmente se hicieron los trabajos de pintura y se colocaron barandales en ciertas zonas.

En la siguiente imagen se puede observar el aproche a la entrada del puente (margen derecha), por donde se tenía el acceso a la comunidad de Santa María Picula del Estado de San Luis Potosí.



Figura 5.61 Aproche a la entrada del puente (margen derecha) y rampa para bajar al río Claro.

En la salida del puente (margen izquierda), por donde se tenía el acceso a las comunidades del Estado de Hidalgo y donde se ubica el caballete No. 1, se contruyó el aproche siguiendo el alineamiento horizontal del puente, al igual que en la entrada del mismo; sin embargo, en la siguiente imagen se puede observar que no hubo una mejora considerable en los caminos de terracería existentes, y a su vez, se puede ver la orientación con que llegan dichos caminos al puente.



Figura 5.62 Salida del puente (margen izquierda) donde se observan el camino de terracería existente y el aproche construido siguiendo el alineamiento horizontal del puente.

Una vez concluida la construcción del puente se inauguró y abrió a la circulación para fortalecer el desarrollo de la comunidad.



Figura 5.63 Inauguración del puente "Santa María Picula".

6. Conclusiones

Los puentes son obras de infraestructura que permiten el desarrollo de las comunidades en amplios sentidos, pero sobre todo, comunican e integran a la sociedad. La construcción de cada puente enfrenta retos particulares y únicos que hay que resolver de la mejor manera posible. Es por ello que realizar estudios previos y visitas de campo es de fundamental importancia, pues nos permitirá conocer mejor el proyecto que estamos por hacer y nos ayudará a estar mejor preparados ante los problemas que se presenten durante la construcción de cualquier tipo de obra de ingeniería civil, para llevarla a su consecuente éxito. No obstante, requerimos que dichos estudios estén completos y sean realizados por especialistas en cada ámbito, para contar con la información que realmente necesitamos saber cómo ingenieros civiles.

Es muy importante hoy en día que las obras sean construidas sin producir un impacto negativo en el medio ambiente, aspecto que antes no se tomaba en consideración y que la Semarnat está encargada de regular. Ahora si la construcción de una obra no es viable desde el punto de vista ambiental, ésta no se hace. Debemos cuidar nuestro planeta, pues enfrenta cambios climáticos significativos y sólo tenemos uno, además, hay que tomar en cuenta también que no sólo lo habitamos nosotros, por ello no debemos dañarlo. Asimismo, nuestra responsabilidad como ingenieros civiles es el beneficio de la sociedad sin dañar al medio ambiente.

Los puentes cada día se construyen más largos, uniendo lugares que en otros tiempos hubiera sido impensable; salvando también los obstáculos más inverosímiles. Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevas tecnologías y se han mejorado los materiales empleados en la construcción, que si sabemos implementar y utilizar, nos permiten lograr mejores estructuras, con los máximos estándares de calidad.

Cada puente debe tener un diseño propio que se adapte a sus circunstancias particulares. Asimismo, no hay un único procedimiento constructivo para la realización de una obra; el tiempo y las circunstancias nos obligan a cambiar, pues siempre surgen nuevos retos que hay que resolver y superar.

Tal es el caso del puente “Santa María Picula”, que a pesar de que normalmente en un puente de este tipo se construye primeramente el arco y después la superestructura del mismo, en este proyecto se ejecutó al revés, montando primero las traveses y usando éstas como grúas viajeras para la construcción del arco, pues como se mencionó en este trabajo, no se podía invadir el cauce del río con maquinaria. Haciendo que el procedimiento constructivo empleado fuese no

convencional e innovador, para lo cual se tuvo que tener una mente flexible. Esto nos demuestra que no hay imposibles, si nos atrevemos a resolver los problemas a los que nos enfrentamos y sumamos la fuerza de voluntades con un mismo objetivo, podemos lograr una hazaña de este tipo.

El desarrollo no se da de golpe, hay que trabajar duro e investigar, aprender de nuestros errores, deficiencias, e inclusive de nuestros aciertos, para obtener un mejor rendimiento en el siguiente proyecto que tengamos que hacer, lo que a su vez nos llevará a alcanzar mejores resultados.

El puente “Santa María Picula” fue construido en tiempo y forma, y de igual forma cumplió con el costo pactado en el contrato. Como se mencionó en este trabajo la inversión requerida para la construcción del puente fue de \$ 25,000,000.00 (veinticinco millones de pesos 00/100 M.N.). Resultó ser un puente muy económico por las técnicas empleadas en su construcción y el ahorro en el uso de maquinaria.

Considero que es importante mencionar que en este puente no se construyeron topes antisísmicos, los cuales sirven como una barrera para evitar que las trabes del puente caigan por algún movimiento brusco y excepcional, pues recordemos que éstas son simplemente apoyadas. Desconozco la razón por la que no fueron construidos dichos elementos. Posiblemente por el bajo tránsito vehicular.

La aceleración de la economía en México hace indispensable crear más y mejores carreteras con trazos más rectos, en donde la eficiencia de gasto de combustible y la disminución de tiempos de recorrido satisfagan las necesidades del desarrollo económico. Sin la capacidad de construir puentes en un país con una orografía tan accidentada como la de la República Mexicana, las posibilidades de crecimiento económico serían más lentas.

A medida que se facilitan y simplifican las cosas se está haciendo ingeniería, ya que esa es su filosofía. Tratando de obtener siempre la mejor solución a nuestro alcance, optimizando los recursos con que contamos, eso hace un verdadero ingeniero civil.

Siempre que se vaya a realizar una obra hay que pensar hacia el futuro, y no solamente para el momento en que está se requiere, pues las circunstancias cambian, y con ello, las necesidades.

7. Anexos

Anexo 1 – Matriz de Leopold

Matriz 7.1 Identificación de impactos ambientales (matriz de Leopold).

|  | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------------|---|----------|--------------------|----------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|----|
| MATRIZ DE LEOPOLD, REDUCIDA MODIFICADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES | | | PREPARACIÓN DEL SITIO | | | | CONSTRUCCIÓN | | | | | | | OPERACIÓN Y MTTTO. | | VALORACIÓN CUANTITATIVA | | | | | |
| SIMBOLOGÍA: | | | DESARROLLO | DESPALME | CORTE Y EXCAVACIÓN | RELLENDO | CONSTRUCCIÓN DE ESTRIBOS | CONSTRUCCIÓN DE PILAS | CONSTRUCCIÓN DE TERRACERAS | CONFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE | CONSTRUCCIÓN DE OBRAS COMPLEMENTARIAS | CARPETA ASFÁLTICA | MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS | SEÑALIZACIÓN | REFORESTACIÓN | OPERATIVIDAD | TRÁNSITO VEHICULAR | IMPACTOS ADVERSOS | IMPACTOS BENEFICOS | TOTAL IMPACTOS | |
| CARÁCTER DEL IMPACTO a ADVERSO NO SIGNIFICATIVO A ADVERSO SIGNIFICATIVO b BENEFICO NO SIGNIFICATIVO B BENEFICO SIGNIFICATIVO / MITIGABLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MEDIO FÍSICO | AGUAS SUPERFICIALES | DRENAJE | a | a | a | a | a | a | a | a | b | a | / | B | | | 7 | 2 | 9 | | |
| | | CALIDAD | / | / | / | / | / | / | a | a | a | a | / | | B | | | 10 | 1 | 11 | |
| | | DRENAJE | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| | | CALIDAD | | | | | | | | | | b | | | | | | | 0 | 1 | 1 |
| | AGUAS SUBTERRANEAS | EROSIÓN | | | | | b | a | | | | | | | | B | | | 1 | 2 | 3 |
| | | CALIDAD | | | | | | | | | | | | | B | | | | 0 | 1 | 1 |
| | | GEOMORFOLOGÍA | | | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | 6 | 0 | 6 |
| | | USO POTENCIAL | | | | | | | | a | a | | | | | | | | 2 | 0 | 2 |
| | ATMÓSFERA | CALIDAD | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | B | / | / | | 10 | 1 | 11 |
| | | RUIDO | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | B | / | / | | 10 | 1 | 11 |
| MEDIO BIÓTICO | FLORA | DE HUMEDAL | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| | | TERRESTRE | | a | | | | | | | | | | | B | | | | 1 | 1 | 2 |
| | FAUNA | DE HUMEDAL | | | | | | a | | | | | | | | | | | 1 | 0 | 1 |
| | | TERRESTRE | | a | | | | | | | | | | | B | | | | 1 | 1 | 2 |
| | DINÁMICA ECOLÓGICA | FLUJOS DE MATERIA Y ENERGÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| | | REPRODUCCIÓN | | | | | | | | | | | | | B | | | | 0 | 1 | 1 |
| | | ALIMENTACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| | | REFUGIO | | | | | | | | | | | | | B | | | | 0 | 1 | 1 |
| PASAJE | | a | a | a | a | | a | a | a | a | / | | B | | | | 8 | 1 | 9 | | |
| MEDIO ECONOMICO | ECONOMÍA REGIONAL | ECONOMÍA | | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | 0 | 14 | 14 |
| | | EMPLEO Y MANO DE OBRA | | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | 0 | 14 | 14 |
| | | ESTILO Y CALIDAD DE VIDA | | | | | | | | | | | | | | B | B | | 0 | 2 | 2 |
| | | ACTIVIDAD TURÍSTICA | | | | | | | | | | | | | | B | B | | 0 | 2 | 2 |
| | ASENTAMIENTOS HUMANOS | INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS | | | | | B | B | B | B | B | B | B | B | | B | B | | 0 | 10 | 10 |
| | | ASENTAMIENTOS HUMANOS | | | | | | | | | | | | | | B | B | | 0 | 2 | 2 |
| IMPACTOS ADVERSOS | | | 0 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 2 | 4 | 2 | 0 | 0 | 2 | 2 | 57 | | | |
| IMPACTOS BENEFICOS | | | 0 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 13 | 6 | 6 | | 58 | | |
| TOTAL IMPACTOS | | | 0 | 9 | 8 | 8 | 10 | 9 | 10 | 10 | 7 | 7 | 5 | 3 | 13 | 8 | 8 | | | 115 | |

8. Referencias

Forta Ingeniería. (2015). Estudios de Geotecnia para Exploración Geotécnica. Recuperado el 30 de enero de 2017 de, <http://fortaingenieria.com/geotecnia/>

Instituto Mexicano del Transporte y Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1999). *Modelo de Cargas Vivas Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes en México*. Querétaro, México: Autor. Recuperado el 22 de febrero de 2017 de, <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt118.pdf>

Junta Estatal de Caminos del Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2007, julio). *Manifestación de Impacto Ambiental del Puente Vehicular "Santa María Picula" sobre el río Claro, ubicado en el municipio de Tamazunchale, San Luis Potosí, México*. Recuperado el 20 de enero de 2017 de, <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/slp/estudios/2007/24SL2007V D023.pdf>

Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal. Diario Oficial de la Federación. México. Publicado el 22 de diciembre de 1993.

Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas. Diario Oficial de la Federación. México. Publicado el 04 de enero de 2000.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. México. Publicado el 28 de enero de 1988.

Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015, mayo). *Los Puentes de México 1985-2014*. México: GM Editores. Recuperado el 10 de febrero de 2017 de, <http://sct.gob.mx/publicaciones/pesct/puentes-Mexico.pdf>