LOS PUENTES DE MÉXICO
1985-2014

Biblioteca Mexicana del Conocimiento

LOS PUENTES DE MÉXICO
1985-2014

• Gobierno y Administración Pública •

México 2015

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

BIBLIOTECA MEXICANA DEL CONOCIMIENTO

ENRIQUE PEÑA NIETO
Presidente de los Estados Unidos Mexicanos

GERARDO RUIZ ESPARZA
Secretario de Comunicaciones y Transportes

Los Puentes de México
1985- 2014

D.R. © Gobierno de la República
Secretaría de Comunicaciones y Transportes
Avenida Xola, esquina con Eje Central, S/N,
Col. Narvarte, Del. Benito Juárez
Distrito Federal CP. 03020

Número de registro: BMC-SCT-003-GAP/DD-079

ISBN: 978-607-95879-4-9

Primera edición, mayo, 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, sin la autorización previa y por escrito del Programa Editorial del Gobierno de la República y titulares respectivos.
Hecho e impreso en México

CONTENIDO

MENSAJE DEL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA 7
Enrique Peña Nieto

PRESENTACIÓN 9
Gerardo Ruiz Esparza

INTRODUCCIÓN 11
Raúl Murrieta Cummings

PRÓLOGO 13
Clemente Poon Hung

REFLEXIONES Y RECUERDOS DE UN DISEÑADOR DE PUENTES 15
Modesto Armijo Mejía

LOS PUENTES Y SUS PROCESOS CONSTRUCTIVOS 23
Luis Rojas Nieto

UN RECORRIDO POR LOS PUENTES DE MÉXICO, 1985-2014

Viaducto La Marquesa, 1987 46
Estado de México
Puente Tampico, 1988 50
Estado de Tamaulipas
Puente Atenquique II, 1991 62
Estado de Jalisco
Puente Mezcala, 1993 66
Estado de Guerrero
Puente Quetzalapa, 1993 76
Estado de Guerrero
Puente Barranca El Zapote, 1993 80
Estado de Guerrero
Puente Barranca El Cañón, 1993 84
Estado de Guerrero
Puente Papagayo, 1993 88
Estado de Guerrero
Puente Calapa, 1993 94
Estados de Puebla y Oaxaca
Puente Zacatal, 1994 98
Estado de Campeche
Puente Papaloapan, 1995 106
Estado de Veracruz
Puente Río Grijalva I, 2001 110
Estado de Tabasco
Puente Arroyo Pinzandarán, 2003 114
Estado de Michoacán
Puente Infiernillo II, 2003 120
Estado de Michoacán
Puente Chiapas, 2003 126
Estado de Chiapas
Puente Neverías, 2004 138
Estado de Durango
Puente Barranca Begoña, 2005 142
Estado de Michoacán
Puente Texcapa, 2005 146
Estado de Puebla
Puente San Cristóbal, 2006 152
Estado de Chiapas
Puentes El Piojito, 2007 158
Estado de Baja California Sur
Puente La Pinta, 2008 164
Estado de Durango
Puente Guamúchil II, 2008 168
Estado de Sinaloa
Puente Río Rosas, 2009 172
Estado de Hidalgo
Puente Yucalpetén, 2009 176
Estado de Yucatán
Puente Bicentenario, 2010 182
Estado de Aguascalientes
Puente Nuevo Tonalá, 2010 188
Estado de Tabasco
Puente Albatros, 2010 192
Estado de Michoacán
Puente Magiscatzin, 2011 200
Estado de Tamaulipas
Puente Pueblo Nuevo, 2011 206
Estado de Durango
Puente Paso de Piedra, 2011 210
Estado de Durango
Puente El Nuevo, 2011 214
Estado de Jalisco
Puente El Platanito, 2012 220
Estado de Durango
Viaducto Xalapa, 2012 224
Estado de Veracruz
Puente Santa Lucía, 2012 228
Estado de Sinaloa
Viaducto Botijas, 2012 232
Estado de Durango
Puente La Cascada, 2012 236
Estado de Sinaloa
Desvío Ferroviario Vaso II de la laguna de Cuyutlán, 2012 240
Estado de Michoacán
Puente Baluarte, 2012 248
Estados de Sinaloa y Durango
Puente El Carrizo, 2013 264
Estado de Sinaloa
Puente Barranca del Diablo, 2013 272
Estado de Nayarit
Puente Horganal, 2013 276
Estado de Oaxaca
Puente Internacional Ferroviario Matamoros-Brownsville, 2013 280
Estado de Tamaulipas
Puente Gilberto Borja Navarrete, 2014 284
Estado de Puebla

AGRADECIMIENTOS 299

MENSAJE

México es reconocido internacionalmente por la construcción de grandes obras de ingeniería civil. La creación de puentes de alta complejidad técnica forma parte de esta tradición de excelencia.

Los puentes comunican, integran y, sobre todo, unen a los mexicanos. Son parte esencial de la amplia red carretera de nuestro país, al atravesar 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.

Este libro da cuenta de las hazañas de la ingeniería mexicana en el diseño de puentes, a lo largo de las últimas tres décadas. Detrás de estas obras, está el trabajo comprometido de miles de ingenieros, arquitectos, técnicos y obreros. Se trata de una labor monumental, pero muy poco conocida; de ahí la importancia de esta publicación.

Los puentes son emblema del México moderno y competitivo del siglo XXI. Son creaciones maestras de nuestra ingeniería, que merecen ser conocidas y valoradas por la población. Estoy seguro de que este libro inspirará a los mexicanos a redoblar esfuerzos en la construcción de una mejor nación.

Construir puentes es fortalecer, transformar y mover a México. Por eso, en esta administración seguiremos creando puentes de clase mundial.

Enrique Peña Nieto
Presidente de los Estados Unidos Mexicanos

PRESENTACIÓN

México cuenta hoy con una infraestructura carretera que es reflejo de una nación pujante ante un futuro promisorio. Sin embargo, tenemos que continuar este esfuerzo en el crecimiento sostenido de nuestra red carretera para convertir a nuestro país en un gran centro logístico global de alto valor agregado.

Por su ubicación geográfica dentro del continente es fundamental que nuestro país tenga carreteras modernas, bien equipadas y tecnológicamente logradas, donde su posición estratégica se convierta en factor de competitividad e integración de nuestra economía en el concierto de los mercados internacionales y, al mismo tiempo, dé una respuesta eficaz a los desafíos que generan nuestras necesidades internas; en suma, desarrollar una conectividad logística que abata los costos de transporte, garantice la seguridad en sus recorridos y provoque un estímulo de actividades sociales y económicas, que resulten en un mayor valor de los productos hechos en México.

El gobierno actual en su plan de desarrollo carretero se ha fijado una meta sin precedentes para llevar a cabo esta tarea con una inversión de no menos de 4 billones de pesos en proyectos de infraestructura, donde destacan 15 autopistas, 29 carreteras, 16 libramientos, 7 puentes, que junto a la modernización de las carreteras existentes, llegará a un total de 19 mil kilómetros de autopistas, carreteras y caminos de calidad y de alto rendimiento. También se considerará un nuevo impulso a las vías férreas, no sólo modernizando sino ampliando nuevas rutas.

Una carretera moderna es aquella cuyo trazo permite un ahorro en tiempo y combustible, donde la seguridad del usuario es factor primordial en su diseño. Carreteras como la Durango-Mazatlán, inaugurada dentro del primer año de gobierno del Presidente Enrique Peña Nieto, es un ejemplo claro de lo que este país necesita para cumplir con los retos mencionados, al contar en su trazo con 115 puentes, estructuras clave para lograr vencer una orografía adversa que desafía la elevada capacidad técnica de nuestros ingenieros.

Los puentes son hoy uno de los recursos más utilizados en la nueva generación de autopistas que se construyen en nuestro país y merece una reflexión sobre estas notables estructuras que son un portento técnico. A través de las páginas de este libro, el lector conocerá los más diversos tipos de puentes que se han construido en México las últimas tres décadas, y comprenderá cómo fueron hechos, la complejidad que presentaron los diseños y los procesos constructivos que se adecuaron a las situaciones específicas de su edificación. Descubriremos los avances tecnológicos en esta materia y constataremos que contamos con dos de los puentes más sofisticados en todo el mundo; tenemos el puente atirantado más alto del mundo entre los estados de Durango y Sinaloa, el puente Baluarte, que ya está en funcionamiento, y en el estado de Puebla, existe el Puente Gilberto Borja Navarrete, que después del viaducto Millau en Francia, tiene la pila más alta.

Finalmente, es importante fortalecer la participación del sector privado de la construcción en estas tareas, donde la ingeniería mexicana, representada también por el equipo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se ha distinguido por su gran competitividad. Aprovecho este espacio para reconocer la gran capacidad de nuestros ingenieros civiles, proyectistas y constructores, que han sabido sortear los más diversos obstáculos y dificultades para cumplir con su deber de manera brillante.

Así pues, celebremos con esta obra 29 años de trabajo duro y resultados sorprendentes en la construcción de puentes, en un México que está listo para enfrentar el siglo XXI que traerá grandes retos en materia de infraestructura carretera.

Gerardo Ruiz Esparza
Secretario de Comunicaciones y Transportes

INTRODUCCIÓN

Nuestro país en este nuevo siglo ha logrado importantes metas en materia de comunicación, y ha sido la Secretaría de Comunicaciones y Transportes la encargada de ejercer esta noble e incansable tarea de acercar personas y lugares a lo largo y ancho del extenso territorio nacional.

Para alcanzar estos objetivos de comunicación, el desarrollo de la infraestructura carretera es uno de los rubros primordiales en los que todas las administraciones han invertido capitales monetarios y humanos. Para ello han creado modelos de financiamiento, han procurado elevar la calidad de los servicios, se ha aumentado la eficiencia y productividad en los proyectos carreteros, han permitido el acceso a nuevas tecnologías y formas de administración de recursos; en resumen, han realizado todo lo humanamente posible para llegar a un solo fin: contar con caminos seguros, rápidos y económicos.

En medio de estos caminos existen estructuras grandes y pequeñas que hacen, en todos los casos, que la unión entre dos puntos se acorte; estas estructuras son los puentes, objeto de esta nueva edición que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes pone ante el lector para acercarlo a la experiencia enriquecedora de lo que significa construir estas invaluables piezas de ingeniería.

Esperamos que esta edición cumpla varios objetivos, entre ellos, dar a conocer las complejas implicaciones económicas, sociales, administrativas, tecnológicas y ecológicas que se conjugan desde el momento mismo en que inicia la planeación de un puente que pertenecerá no sólo a un camino o a una autopista, sino a un eje troncal de un sistema carretero mucho más complejo.

Este libro hace un recorrido por 29 años de construcción de puentes en México, desde 1985 hasta el 2014, y finalizará con una visión a futuro de las nuevas estructuras que se construirán en nuestro país, porque siempre hay que estar a la vanguardia.

Es nuestro deseo que esta visión panorámica le brinde al lector la posibilidad de distinguir los avances en las mejoras de las vías de comunicación en los últimos tres lustros y el inicio del nuevo milenio; el esfuerzo del Gobierno de la República a pesar de cualquier adversidad para procurar siempre el bienestar de los mexicanos y al mismo tiempo hacer de la construcción de puentes una nueva era en la historia de los caminos.

En esta historia de casi tres décadas hay mucho que contar: experiencias de un alto grado de complejidad que le han dado a los ingenieros de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la oportunidad de aceptar retos y proponer soluciones adecuadas a cada uno de los proyectos.

Dejemos entonces que ingenieros y personal técnico nos den un recorrido por todos estos logros constructivos, varios de ellos reconocidos mundialmente y orgullosamente realizados por ingenieros y personal mexicano.

Raúl Murrieta Cummings
Subsecretario de Infraestructura
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

PRÓLOGO

En el año de 1987 la Secretaría de Comunicaciones y Transportes terminó el puente Tampico en el puerto tamaulipeco, estructura que se consideró en su momento, punta de lanza hasta entonces con la mejor tecnología para la construcción de puentes en México. Hoy, tenemos el puente Baluarte, el más alto de su tipo en el mundo, otro prodigio de la ingeniería mexicana que marca un hito en la historia de las comunicaciones en México, al vencer las escarpadas montañas de la Sierra Madre Occidental, une a los estados de Durango y Sinaloa para hacer realidad la vía más moderna de comunicación entre el Golfo de México y el Océano Pacífico en el norte de país a través de la Autopista Durango-Mazatlán, complemento del eje carretero Matamoros-Mazatlán.

Pero orgullosamente, también contamos con el Puente Gilberto Borja Navarrete, que tiene la segunda pila más alta del mundo y forma parte de otro de los corredores carreteros más ambiciosos e igualmente complicados, el eje Acapulco-Tuxpan.

Durante estos 29 años, la 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. Se logró unir la Ciudad de México con el puerto de Acapulco en un recorrido de menos de cuatro horas; el puente Chiapas que atraviesa el embalse de la presa Malpaso logró conectar el sur del país a través de una carretera moderna y eficiente con Centroamérica; el proyecto de la autopista México-Tuxpan es el corredor comercial más importante de comunicación entre el Distrito Federal y el puerto de Tuxpan, y el camino más corto desde el centro del país hasta la ciudad de Brownsville, Texas, en la Unión Americana; en 2012 se venció la agreste orografía de la Sierra Madre Occidental con un magno proyecto largamente acariciado: la Autopista Durango-Mazatlán entre los estados de Durango y Sinaloa; es éste, el hecho de mayor importancia en la historia de las comunicaciones carreteras en México, al hacer realidad la mejor vía de comunicación entre el Golfo de México y el océano Pacífico, con la delirante cantidad de más de un centenar de puentes, que unen los tramos de lo que es hoy el complemento del eje carretero Matamoros-Mazatlán.

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 de la SCT hemos 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.

Construir puentes no sólo es un desafío técnico para el ingenio de los constructores, un arte que sin duda dará nuevas satisfacciones a todos los que estamos involucrados en esta sorprendente tarea. Invitamos al lector a que comparta esta experiencia, que sin duda es una de las más apasionantes que los ingenieros de carreteras hemos tenido.

Clemente Poon Hung
Director General de Servicios Técnicos
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

REFLEXIONES Y RECUERDOS DE UN DISEÑADOR DE PUENTES

Modesto Armijo Mejía*

El éxito depende de factores circunstanciales
insospechados en cuya identificación
juega un papel determinante la emoción,
la fe, la perseverancia y la aceptación
de las vicisitudes.

Haría falta ser filósofo para poder responder a la pregunta más básica de mi especialidad: ¿por qué construir puentes? No basta con ser creativo, pues esto no tiene una secuencia, no tiene una conexión visible con los factores; es algo intangible. Si hubiera una secuencia o una lógica cuando uno acomete un problema, se obtendría un conocimiento que podría fácilmente ser transferido a muchas personas. Pero la realidad no es así.

Para diseñar puentes, uno se debe atrever a pensar fuera de los cánones, porque si uno se limita a seguir las reglas, simplemente demuestra que no tiene gran sensibilidad. Hay que aprender a estar inconforme con uno mismo y con lo que hace para evitar repetir los posibles errores la siguiente vez. Conscientemente nunca repito las cosas que no me salieron bien en el diseño y la construcción de un puente. Siempre hay que estar mejorando, aunque no cambiando por el simple afán de cambiar. Para mí la directriz filosófica del diseño es reflejar la verdad estructural y sin adornos, buscando que la obra sea limpia.

Diseñar puentes implica gran sensibilidad y no sólo conocimientos técnicos. En una ocasión, hace 60 años, tomé un caso para el cual se habían desarrollado numerosas alternativas, todas con resultados económicos decepcionantes, hasta que comprendí que se estaba trabajando fuera del rango lógico. Se trataba del río Fuerte, que es el río más caudaloso del noroeste mexicano, al que se quería forzar para que aceptara parámetros fuera de su escala. Consideré salvar el río con claros del orden del doble de los considerados en esas alternativas y darle continuidad a la superestructura, características inusitadas en esos tiempos. En consecuencia, se eliminó la mitad de las pilas y la continuidad atemperó el incremento de costo de la superestructura, arrojando un ahorro de 40% respecto de la mejor de las alternativas contempladas. Pero eso no quiere decir que haya encontrado una regla de oro. Todo lo contrario: cada caso exige un especial empeño y ensayos reiterativos para combatir esa natural tendencia de perder la objetividad ante los méritos de las primeras ideas.

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 230 años y todavía existe. 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.

En efecto, medio siglo después aparecieron los ferrocarriles, con mayores exigencias en cuanto a alineamiento y pendiente, lo que se tradujo en puentes más largos y más altos para salvar ríos y barrancas. Los caminos perdieron su función de arterias troncales y conservaron tan sólo su ámbito local.

Pero con la llegada del automóvil, el panorama vuelve a cambiar y los caminos recuperan su antigua importancia. Cuando llegué a México, en el año de 1941, había 6 000 kilómetros de caminos federales pavimentados, que hoy se han decuplicado. Recuerdo que en ese mismo año la única forma práctica de ir de México a Querétaro era por tren. La ciudad de Veracruz estaba conectada por dos ferrocarriles del siglo XIX, uno por Jalapa y otro por Orizaba, pero ya contaba con una carretera, aunque pasando el puerto sólo quedaba la opción del tren. Lo mismo ocurría más allá de Guadalajara. Por supuesto, casi toda la mercancía se transportaba en ferrocarril. Va a ser a partir de los años setenta cuando esto cambie y el transporte de mercancías se comience a realizar mayoritariamente por carretera, lo que nos obligó a replantearnos muchas cosas en lo referente al diseño de puentes. En realidad hubo que replantearse toda la filosofía del transporte.

Página 8: Puente Tampico. Página 10: Puente de la Autopista México-Tuxpan. Página 12: Puente Baluarte. **Enfrente:** Puente Quetzalapa en la autopista México-Acapulco.

* Modesto Armijo Mejía nació en Matagalpa, Nicaragua, el 31 de enero de 1923. Ingeniero Civil de la UNAM, egresado en 1946. Maestro en Ciencias de Ingeniería, con especialidad en Transportes, en la Universidad de Michigan, EUA. Desde 1981 es miembro de la Academia Mexicana de Ingeniería y, a partir de 1997, miembro emérito del Colegio de Ingenieros Civiles de México. Versión libre de una entrevista con el ingeniero a principios de 2013.

Arriba: 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. **Abajo:** 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, brillante fotógrafo, que la hizo por encargo de Ferrocarriles de México en 1903.

En el caso de los puentes, hubo que empezar a considerar el aumento en el peso de los camiones de carga y en la necesidad de diseñar los puentes con mayor anchura. Es decir, teníamos que buscar soluciones para unas nuevas condicionantes. Desde luego, estos cambios nunca se dan de inmediato: son paulatinos. Simplemente van surgiendo las oportunidades, como en el caso de la autopista que cruza la Sierra Madre entre Durango y Mazatlán. En 75 kilómetros hay 57 túneles y 32 puentes mayores, destacando el cruce del río Baluarte, que salva una barranca de 390 metros de profundidad con un claro de 520 metros.

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, un arco rebajado y transparente, en vez del medio punto y calzada sobre relleno, que reinaba en Europa. 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.

Los puentes colgantes también son bastante antiguos y además fueron desarrollados por diferentes culturas de forma independiente. Los incas tenían una red de caminos reales empedrados de 9000 kilómetros, con cuatro metros de ancho, que incluía puentes colgantes (obligados por su accidentada geografía), que utilizaban para el transporte de mercancías a lomo de llamas.

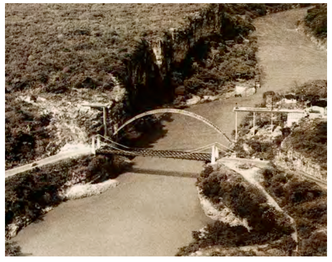
El diseño de puentes, una especialidad que marcó mi vida

Mi formación como ingeniero la recibí en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde tuve un profesor excelente, don Vicente Guerrero y Gama. De él aprendí sobre todo a tener actitud positiva. Él fue mi mentor y gracias a su ayuda me recibí en México. Cuando don Vicente fue mi maestro no había estado en Europa o Estados Unidos, por lo que no tuvo a estos países como su escuela directa, como sí fue en mi caso. Durante mi primer viaje a Europa, en 1956, todo me llamó la atención. A riesgo de parecer molesto, preguntaba acerca de toda obra de ingeniería que veía.

Por razones de viaje de estudios, conocía algo del caso estadounidense. Entonces Europa y Estados Unidos representaban dos escuelas muy diferentes, aunque ahora ya no lo son tanto. Pero esto se debía a factores circunstanciales. Recientemente había terminado la Segunda Guerra, la más destructiva sufrida por Europa en toda su historia, mientras la Unión Americana no fue tocada y más bien salió fortalecida. En comparación con el europeo, el estadounidense tiende a considerar que las cosas son menos permanentes. Con los ferrocarriles empezaron a forjar su criterio, vivían modificando sus conceptos a medida que la red crecía, su experiencia se acumulaba y el país se hacía más poderoso; el proceso era extraordinariamente dinámico y eso se propagó a otras ramas de la ingeniería. Por mencionar un ejemplo, empezaron con locomotoras cuyos pesos eran del orden de 20 toneladas, pero llegó un momento en que una locomotora de vapor alcanzó a pesar más de 600 toneladas, que fue cuando los carboneros de Pennsylvania vieron que se les estaba acabando el negocio porque el diesel estaba sustituyendo rápidamente al carbón, y promovieron, aunque sin éxito, el diseño de locomotoras de vapor más poderosas y eficientes.

Pero volviendo a los puentes, en Estados Unidos cuando los construyen saben que irremediablemente los tendrán que modificar algún día, y por ello no piensan tanto en la temporalidad como en la utilidad. En

Izquierda: 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. **Centro:** En el Perú, los puentes colgantes sorprendieron a los españoles por su manufactura y las alturas que cruzaban. A pesar de su aspecto frágil, estas estructuras cuyos cables eran hechos con fibras vegetales trenzadas siguieron en uso por lo menos hasta el siglo XIX, como lo atestigua este grabado de Ephrain Georges Squier, diplomático y arqueólogo americano. **Derecha:** En México se construyeron puentes de arcos. Su construcción a partir de materiales perdurables fue un ejemplo más de la gran maestría de los ingenieros españoles que estuvieron activos durante la Colonia. **Abajo:** Puente del Rey, hoy Puente Nacional, sobre el río La Antigua, es una obra de principios del siglo XIX. Algunos atribuyen su diseño a Manuel Tolsá, sin embargo no existe suficiente evidencia para asegurarlo. Lo que sí está documentado, es que lo construyeron los hermanos José y Manuel Rincón. De cualquier forma, esta estructura de belleza clásica fue tema para pintores viajeros como Johan Moritz Rugendas y motivo de atención para cronistas extranjeros entre ellos William Bullock, el controvertido viajero inglés.



Arriba: El desarrollo del ferrocarril en México trajo consigo la construcción de muchos puentes. Destacan los que se encuentran en la ruta Ciudad de México-Veracruz que recorre una zona muy escarpada. Inaugurados por Sebastián Lerdo de Tejada en 1869, fue un elemento de gran importancia en la modernización de México. **Abajo:** Construcción del puente Belisario Domínguez sobre el río Grijalva en el estado de Chiapas. La estructura de este puente, diseñado por el ingeniero Modesto Armijo, fue una obra revolucionaria en su tiempo, por el uso de concretos preesforzados. Esta estructura, originalmente diseñada para dos carriles, permitió por su excelente concepción, una ampliación posterior, a cuatro carriles.

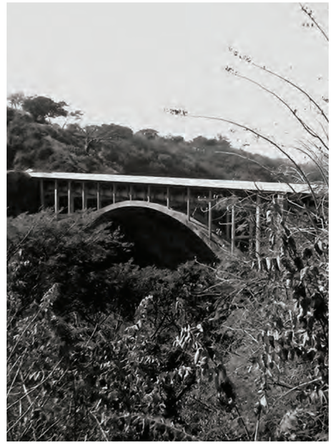
cambio en Europa es fácil encontrar puentes muy antiguos todavía en uso.

Por esa misma razón, el gran constructor de puentes del siglo XX fue Estados Unidos. En parte se debió al hecho de que en Europa, en ese mismo siglo, muchas cosas se hicieron con una mentalidad bélica; por ejemplo, las autopistas. Cuando Estados Unidos construyó la primera autopista rural en Pennsylvania, Alemania tenía más de 3000 kilómetros que fueron realizados en la época de Hitler. La principal razón fue la movilidad. El ferrocarril es muy rígido: para cargar y descargar hay que ir a una estación, lo que no sucede con las autopistas, con las que se pueden realizar casi en cualquier sitio.

En el caso de México, durante la Colonia se tenía la filosofía europea del largo plazo. Esto se mantuvo también durante el siglo XIX. Pero con el tiempo eso ya no funcionó porque los trazos dejaron de ser adecuados, al igual que los anchos y las cargas. Un ejemplo interesante de previsión lo tenemos en los 75 kilómetros de la autopista Durango-Mazatlán que cruzan la Sierra Madre, y que durante varias décadas seguirá siendo totalmente funcional porque se concibió con una estrategia adecuada. En ocho kilómetros donde inevitablemente tenía que ser de cuatro carriles, se adoptaron cuatro carriles; pero en los 67 kilómetros restantes se dejaron dos carriles. De esa forma, cuando el incremento del tránsito lo requiera, en lugar de perturbar y aun cerrar transitoriamente la circulación, simplemente se construirá otro cuerpo, con un trazo razonablemente alejado del actual.

Nicaragua, mi país de origen, ha sido mi inspiración. Desde que era niño me apasioné con la idea de mejorar las comunicaciones entre la gente y los espacios al observar el puente ferroviario Paso Caballos de 300 metros, que comunicaba la isla del puerto de Corinto con tierra firme, una construcción que a mi mente infantil le pareció impresionante, aunque ahora sé que no lo era. Por otro lado, para visitar a mis abuelos en aquella época teníamos que hacer un recorrido de tres días por caminos escabrosos, rudimentarios y polvorientos. Esas vivencias también constituyeron razones que me permitieron reconocer mi vocación. Por motivos políticos tuvimos que emigrar a Guatemala y posteriormente vine a México para estudiar en la UNAM. En ese entonces, todos los estudios y tareas que hacía para las clases los pensaba en función de lo que podía aplicar en Nicaragua. Mi país es muy pequeño; en esa época difícilmente pasaba del millón de habitantes, pero tenía carencias como las de cualquier otro: comunicaciones, carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, energía, organización del territorio, urbanismo, agua, alcantarillado. Cuando tuve la oportunidad de participar en aliviar esas carencias... ¡ésa fue mi escuela!

Todavía recuerdo el primer puente que diseñé. Acababa de terminar el quinto año de la carrera cuando la antigua Secretaría de Comunicaciones me dio un destajo, pequeño contrato sin mayores formalidades administrativas, para que revisara un diseño que habían hecho en Estados Unidos para un puente en México. El funcionario que me otorgó el trabajo me expresó que en el diseño se planteaba utilizar una resistencia del concreto que en México todavía no se podía garantizar, salvo en las grandes ciudades. Se trataba de un proyecto tipo con aplicación repetitiva y se me pidió que lo revisara en su totalidad. Para subsanar mi inexperiencia, decidí acudir a varias bibliotecas en busca de información. Para mi sorpresa, éstas no eran muy generosas en temas generales de puentes y menos aún en otros temas más específicos al respecto. Cuando consideré que había agotado mis posibilidades en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, fui a la Biblioteca Nacional. Le pedí a una de las bibliotecarias que me buscara libros que trataran sobre puentes y ella me entregó una lista que incluía *El puente San Luis Rey*, *El puente Waterloo* y *El puente de los suspiros*, ¡puras novelas! Por suerte, también me llevó un libro casi centenario de puentes. Yo creí que no podría obtener nada de un libro tan antiguo. No me acuerdo el nombre del autor, pero era un libro estadounidense. Lo empecé a ver y me fui percatando de que muchas reglas se habían conservado casi intactas desde entonces. ¿Cómo era posible que nadie hubiera reflexionado acerca de por qué se seguía esa misma rutina? Por ejemplo, recuerdo que como el concreto reforzado aún no existía cuando se editó ese libro, los pisos de los puentes (si éstos eran de acero, que por cierto era el caso que yo estaba investigando) eran de tablones de madera atravesados. Claro, como no había vehículos de motor no hacía falta más. Lógicamente esa modalidad de construcción estaba asociada a ciertas proporciones, a ciertas reglas, a ciertas configuraciones, es decir, a épocas pasadas. También me di cuenta de que muchas de esas reglas subsistían 80 años después, al igual que ahora subsisten algunas que me tocó ver cuando era muchacho. Pero en el caso de los puentes, las recetas pueden ser distorsionantes. Ante esta situación, decidí no hacer caso del proyecto que me pidieron revisar, lo que me obligó a buscar una nueva configuración para cumplir mi encomienda. Tras un análisis concluí que el piso tenía que ser más grueso porque los concretos propuestos no se podían garantizar adecuadamente. Para mi sorpresa, a pesar de que adopté losas más pesadas, los cálculos mostraban que el peso del acero estructural se reducía en 30%, respecto del proyecto que estaba revisando. Entonces el mencionado funcionario, a pesar de ser un ingeniero muy tradicionalista, quedó tan emocionado con el resultado del diseño que



Izquierda: El arco del puente Sifón de Barranca Honda construido en 1949 es un arco de concreto, fue la estructura más grande de su tipo en México durante casi 50 años. **Derecha:** El puente Manhattan en la ciudad de Nueva York es uno de los tres puentes que conectan la isla de Manhattan con tierra firme. Fue diseñado por los ingenieros Ralph Modjeski y León Moisseiff; es una estructura metálica de dos niveles, abierto a la circulación en 1909.

decidió aplicarlo en numerosos casos (treinta y siete, para ser exacto). En los siguientes años me encargaron el diseño de varios de los proyectos de puentes de este tipo.

Ahora bien, es importante destacar que en aquellos años no era fácil la tarea de diseñar puentes en México, pues no había muchos modelos propios a seguir. En la Ciudad de México sólo había 56 000 vehículos de motor cuando yo estudiaba ingeniería y tan sólo un cruce a desnivel para automotores: el puente Nonoalco, que salva las vías del ferrocarril cerca de la estación del mismo nombre. Debido a la guerra en Europa, no se importaban camiones ni automóviles, ni tampoco se fabricaban aquí. Todos los caminos que salían de la Ciudad de México, sin excepción, eran de dos carriles (uno de ida y otro de vuelta) y además muy angostos. Así eran los de Cuernavaca, Puebla, Pachuca y Toluca. La primera carretera de cuatro carriles que se hizo en México, que por cierto no tenía puentes, fue la de México-Cuernavaca, en 1952. En ese ambiente uno no podía adquirir experiencia basada en la realidad nacional, por lo que había que voltear al extranjero o comenzar a pensar por uno mismo.

En 1947 fui a hacer una maestría a la Universidad de Michigan, Estados Unidos. Me inscribí en el curso avanzado de puentes y, después de algunas semanas, el profesor me dijo con toda sinceridad que mejor estudiara otra cosa, porque lo que había aprendido durante tres años de práctica profesional no podía incrementarse significativamente con el curso. Me emocionó la honestidad de mi profesor.

Cuando regresé a México en 1948, comencé a colaborar con Ingenieros Civiles Asociados (ICA), que Bernardo Quintana había fundado apenas un año antes. Me asignaron el diseño del puente Sifón de Barranca Honda, que durante 50 años fue el arco de concreto más grande de México. Me indicaron que podían contratar asesores europeos, pues en esa época era algo fácil de hacer, ya que Europa seguía muy empobrecida por la guerra y había personal con experiencia que venía por poco dinero, pero no fue necesario. Todo lo hicimos nosotros gracias a un intenso intercambio de opiniones y de la poca experiencia que teníamos quienes trabajábamos en ICA. Ese puente se mantuvo en excelentes condiciones hasta que el aumento del volumen vehicular y del peso de los camiones de transporte regular y los especiales para los equipos electromecánicos destinados a la hidroeléctrica Infiernillo comenzaron a lastimarlo ostensiblemente. En 1985 me encargaron que lo arreglara. Tuvimos que aumentarle el ancho y algunas dimensiones para que fuera capaz de soportar las nuevas cargas, además de aumentar su resistencia a los sismos, pues recordemos que acababa de ocurrir el sismo que afectó gravemente a la Ciudad de México. Pensamos a futuro y el puente ahí sigue, después de 60 años de servicio, en satisfactorias condiciones.

Siempre hay que ver a futuro, nunca diseñar y construir para el momento. Durante los primeros años de

Puente Ingeniero Fernando Espinosa, sobre la barranca de Oblatos en el estado de Jalisco es una maravilla de la ingeniería mexicana. Su estructura singular es un ejemplo de las adecuaciones y uso de elementos constructivos para lograr una solución económica y funcional.

mi ejercicio profesional 97% de los puentes era utilizado por menos de 2 000 vehículos diarios y los camiones que se consideraban en el diseño pesaban tan solo 15 toneladas. Ahora los camiones pesan 60 toneladas en promedio y el tránsito medio llega a ser de decenas de miles de vehículos. Esos hechos reflejan lo que teníamos que prever.

El problema era lograrlo sin incrementar ostensiblemente el presupuesto, porque entonces se corría el riesgo de que no se aprobara el proyecto. Uno podía jugar con los costos marginales, pero nada más.

Un ejemplo muy claro de cómo hay que saber prever, es el puente Manhattan, en Nueva York, un colgante con casi un kilómetro de claro que atraviesa el río Hudson. Fue construido en los años cuarenta. El autor del proyecto, sin consultarlo con las autoridades, lo dejó preparado para ponerle un segundo piso en la parte de abajo, porque él sentía (y esos sentimientos no se pueden demostrar tan fácilmente) que el tránsito iba a crecer tremendamente al conectar Manhattan con Nueva Jersey, lo que ocurrió muchos años más tarde, cuando se construyó ese segundo nivel en el puente.

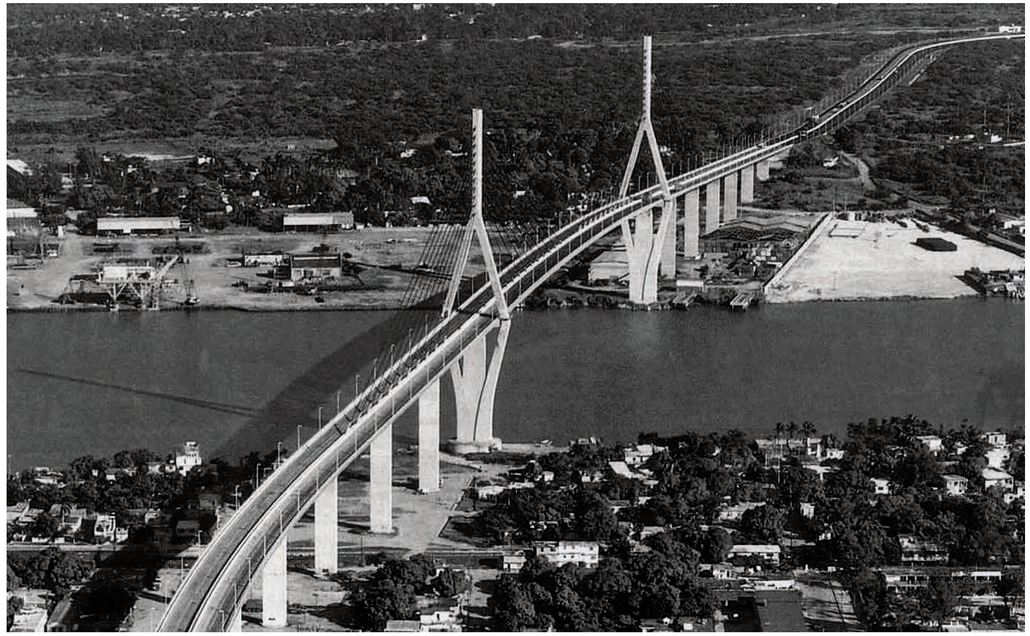
Esto nos demuestra una vez más que no hay reglas universales en el diseño de puentes. Uno tiene que ajustarse a la realidad de su país y a las características del lugar donde se planea construir. No podíamos ni debíamos diseñar una obra en Chiapas como si uno estuviera en Nueva York, en donde se consiguen fácilmente todos los equipos que se deseen prácticamente a la vuelta de la esquina, mientras que en Chiapas había que llevarlas desde lejos y en aquella época la situación era mucho más crítica que hoy. Por otra parte la diferencia de salarios era abismal. Si uno se empeña en copiar al pie de la letra lo que hacen los países exitosos las cosas salen mal económicamente hablando. Pero además se necesita capacidad, voluntad y fe para adaptar exitosamente. Para mí el subdesarrollo se termina cuando una sociedad tiene fe en sí misma. Y siempre hay que recordar que ninguna obra es perfecta y todo es susceptible de perfección. Imitar al afortunado no siempre garantiza el éxito.

Por eso mismo siempre estoy analizando nuevas modalidades estructurales, pero procurando nunca forzarlas. Si yo veo que el diseño es caro o demasiado complicado, ni lo vuelvo a considerar.

En el caso del puente Tampico, el problema al que nos enfrentamos fue el viento. Para contrarrestarlo, decidimos flanquear el claro principal de 360 metros, con varios más pequeños de 70 metros, violentando los cánones que aconsejan claros adyacentes del mismo orden que el principal. Con el arreglo adoptado cuando el puente tiende a oscilar por el viento, los claros pequeños actúan como amortiguadores por lo que el comportamiento frente a los efectos dinámicos es muchísimo mejor. Los estudios en túnel de viento que se hicieron en Francia (porque aquí no contábamos con esas instalaciones) mostraron resultados sorprendentes. De lo que se trataba era de que la estructura fuera más gentil con el viento. De que lo dejara pasar con menos esfuerzo.

Una cosa que nunca me ha atraído es el formalismo: no soy de esa escuela. Yo no adorno los puentes. Nunca lo he hecho porque me parece que lo que se hace forzado pierde trascendencia. Si la estructura refleja la realidad del comportamiento que va a tener, puede durar más años con poca depreciación de su valor estético. No me gusta poner adornos porque prefiero que se defienda más en el futuro con la sencillez y con la tranquilidad de sus superficies.

La configuración que adopté para el puente Papagayo no la consideré inicialmente, pero ante el hecho de que otras alternativas resultaban costosas y difíciles de construir, decidí enfrentar el nuevo desafío y buscar



El puente Tampico en el estado de Tamaulipas marca un hito en la concepción estructural de este tipo de puentes en el mundo. Su diseñador, Modesto Armijo, recibió múltiples reconocimientos al lograr con esta estructura una mayor estabilidad en el claro central. Por este proyecto, México recibió dos premios internacionales: en Estados Unidos: el reconocimiento del ACI (American Concrete Institute) y en España la Fundación Puentes de Alcántara, reconoció la obra como la más destacada en el mundo Ibérico en el periodo 1987-1988.

una solución especial. Para eso hay que tener una especie de fe racional. Suena extraño, pero simplemente se trata de sentir que se puede resolver algo, aunque en ese momento no se sepa cómo. Y este sentimiento, desde luego, no se encuentra en los libros: sólo se adquiere con la experiencia.

Cada puente importante debe tener un diseño propio que se adapte a sus circunstancias particulares. En los que he diseñado tanto en México (como los puentes Tampico, Mezcala, Papagayo, Pueblo Nuevo, García Sela, Nuevo Texcapa, Carrizo, Espinosa y Belisario Domínguez) como en otros países de la América Latina, he procurado siempre que tengan personalidad propia.

Por último, quisiera comentar lo importante que es estar al día en los avances tecnológicos para diseñar los puentes. En mi caso particular, desde hace más de 20 años soy un estudioso de lo digital y es algo que practico día a día. Empecé a trabajar con regla de cálculo y calculadoras mecánicas, y ahora lo que hago es aprovechar los nuevos y poderosos sistemas que necesitan especialistas para manejarlos. En la actualidad, me siento con los ingenieros jóvenes y juntos configuramos los proyectos, en una especie de enseñanza mutua.

Sin embargo, el pensamiento para el trabajo sigue siendo el mismo, lo único que cambia es cómo se procesa la información. Si por falta de reflexión se incorporan datos improcedentes, lo que sale es un engendro. Pero ahora, cambiar esos datos improcedentes es cosa de segundos, cuando antes nos llevaba días, semanas o meses.

Soy un apasionado de lo que hago; para mí la emoción comienza desde que se gesta el proyecto y siempre me vienen a la cabeza las vivencias de mi infancia y juventud. Considero que cada trazo o cálculo que haga al diseñar un puente es mi aporte personal para beneficiar a las personas y acercarlas entre sí. Esa debe ser siempre la función principal de los puentes.

LOS PUENTES Y SUS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Luis Rojas Nieto
Expresidente de la XX Mesa Directiva de la AMIVTAC

Los seres humanos han tenido una larga relación simbólica con los puentes (real o imaginaria) desde la antigüedad. Son un arquetipo en muchas culturas del mundo al ser sinónimos de unión, paso, posibilidad, salvación, etc. Siempre han tenido un significado positivo para los hombres y mucho se ha estudiado el sueño arquetípico de los puentes, cuyo símbolo está vinculado al descubrimiento, al cambio o a la posibilidad. Su significado ha dejado de lado la estructura material de donde toma su nombre para convertirse en una palabra con múltiples acepciones: el que posibilita la comunicación entre los hombres y las culturas; un paliativo para la soledad, así como la unión de seres y culturas a través del esfuerzo humano. Es una palabra que lleva en sí misma la idea de cambio; de ese que provee al hombre de toda clase de beneficios a través de la unión.

Más allá de discusiones filosóficas, los puentes son símbolo de civilización; lo 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.

Muchas ciudades europeas tienen puentes para conectar riberas: en Florencia, el Ponte Vecchio; en París el Pont Neuf; en Berlín, el puente de Oberbaum y en Venecia, el Rialto, todos construidos entre los siglos XVI y XVIII. En México, durante la época colonial la construcción de puentes fue común; fueron edificados con argamasa: el puente Nacional, en Jalisco, es un ejemplo notable.

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. En nuestro país, el ferrocarril, que salía de la capital hacia el puerto de Veracruz, fue el primer hito que marcó el punto de partida de los puentes en el país durante la época porfiriana.

En el siglo XX, el concreto armado y más tarde el presforzado (patentado por Eugène Freyssinet), contribuyeron más al desarrollo de las técnicas constructivas, abaratando costos. En la actualidad, el presfuerzo se utiliza prácticamente en todos los procesos de construcción.

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 unir; salvando también los obstáculos más inverosímiles.

Los puentes siempre serán iconos de una época y testigos del avance tecnológico, social y económico de la historia de un país. Por ejemplo, China, con el crecimiento económico más alto del mundo, ha construido recientemente una gran cantidad de puentes. Tenía el récord del puente con el claro más largo del mundo: el Sutong, que cruza el río Yangtsé, con una longitud de 1088 m, hasta que en Rusia fue construido el puente Russki en Vladivostok, con un claro de 1104 metros.

En México se construyó el puente atirantado Baluarte, el más alto del mundo en su tipo, con una altura de 402.57 m desde el lecho del río Baluarte hasta el nivel de la rasante de la autopista. Con esta estructura y los 55 puentes restantes que conforman el tramo desde la ciudad de Durango hasta el puerto de Mazatlán, queda resuelto un problema de conectividad estratégica en la carretera Durango-Mazatlán, complemento del eje carretero que va del puerto de Tampico en el Golfo de México, hasta el océano Pacífico. Este proyecto de gran magnitud es en sí mismo un espectáculo que está en armonía con la Sierra Madre Occidental; sin duda, es todo un hito dentro de la construcción de puentes en el mundo.

Enfrente: Puente Texcapa de la carretera México-Tuxpan, uno de los más notables por su diseño construido en México en este siglo.

Arriba izquierda: Anónimo, *Pont Neuf*, Museo Carnavalet, París, Francia. **Arriba en medio:** Joseph Mallord William Turner, *Puente Rialto en Venecia*, 1820. Grabado sobre papel, Museo Británico. **Arriba derecha:** El desarrollo de las líneas de ferrocarriles en México impulsó la construcción de vías con puentes que salvaban importantes claros, como el puente cercano a la estación Dos Ríos, en Coahuila, que cuenta con un sistema mixto de apoyo y suspensión por cables. **Abajo izquierda:** El puente Sutong, construido en la República Popular China que cruza el río Yangtzé; es un símbolo de la pujante economía de esta potencia mundial. La longitud total de este coloso es de 8 206 m. Abajo **derecha:** El puente Russki que une la isla Russki con la ciudad de Vladivostok en Rusia, es actualmente el puente atirantado con el claro más largo del mundo, con una longitud de 1104 m, foto cortesía Freyssinet. **Enfrente:** El puente Baluarte, el más alto de su tipo en el mundo entero, magna estructura de la ingeniería del siglo XXI en México.

En otra zona de nuestro país, en la carretera México-Tuxpan, el puente Texcapa salva una cañada enclavada en una zona natural protegida sin causar mayores afectaciones a flora y fauna. Más adelante en esta misma vía fue construido el viaducto San Marcos, con las pilas más altas construidas en nuestro país. Los obstáculos que libran ambas estructuras convierten a esta autopista en la más rápida, desde el centro de México hacia Estados Unidos.

Es importante mencionar que la era de la informática vino a revolucionar la construcción, al igual que a todas las áreas de la tecnología. Basten algunos ejemplos. En la actualidad, existen computadoras con programas capaces de resolver problemas de diseño y seguimiento de obra, los cuales son utilizados para la adecuación de los proyectos originales con gran confiabilidad, lo que antes hubiera tomado muchas horas hombre para lograrse.

Los recientes avances tecnológicos, en sensores remotos y transferencia digital de datos, han hecho posible que se obtengan registros muy exactos en el posicionamiento y diseño de una estructura en tiempo real, lo que permite al constructor estar en condiciones de hacer los ajustes necesarios y así, mantener un ritmo casi ininterrumpido en el avance de las obras. Asimismo, están los distintos tipos de concreto, diseñados para cumplir con diversas funciones en procesos mucho más eficientes y rápidos de colado, junto a cimbras autotrepantes y autotransportables, que disminuyen significativamente los tiempos de avance en obra. Sistemas de izaje más efectivos, con estructuras más ligeras que se apoyan en herramientas, como las estaciones totales, que permiten supervisar los trazos de las carreteras a partir del uso de rayos láser, para evitar desvíos en las líneas de trazo. En resumen, los puentes cada día, serán estructuras más recurrentes para hacer carreteras rápidas y así, resolver problemas viales en carreteras y zonas urbanas.

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.

Arriba izquierda: El puente suspendido en las cataratas del Niágara, fue visualizado por William Hamilton Merritt y construido por las empresas Niagara Falls Suspensión Bridge Company de Canadá y por la Compañía del Puente Internacional de Nueva York. Fue abierto al público el 1 de agosto de 1848. **Arriba centro:** Este gran puente sobre el río Ohio une Cincinnati con Covington, en el estado de Kentucky. En su momento (1856) fue el puente de suspensión más largo del mundo, una auténtica maravilla de la ingeniería, y sentó las bases para la construcción de célebres puentes de este tipo, como el de Brooklyn o el *Golden Gate*, en San Francisco. **Arriba derecha:** El puente de Brooklyn une los distritos de Manhattan y Brooklyn, en Nueva York. Fue construido entre 1870 y 1983; para el momento de su inauguración era el puente colgante más grande del mundo. Mide 1 825 m de largo, y la luz entre pilas es de 486 m. **Abajo:** Puente Strömsund, en Suecia. **Enfrente arriba:** El puente Theodor Heuss, junto con los puentes Oberkassel y Rheinkniebrüke, forman el conjunto de puentes Düsseldorf. El Theodor Heuss tiene dos carriles en cada dirección. En su apertura (1957) fue el primer atirantado de Alemania. Lo forman cuatro torres independientes con una altura de 44 m; cada una lleva tres cables de acero paralelos. Los claros del puente son de 108 m, 260 m y 108 m. Este puente se hizo para disminuir los problemas de tránsito de la zona que conecta con el aeropuerto. **Enfrente abajo:** El puente atirantado Tampico incluyó en su diseño la tecnología de construcción de viaducto, lo cual no sólo permitió un avance en el momento de construirlo, sino un ahorro sustancial en el presupuesto. Este diseño de ingeniería mexicana ha sido ejemplar en el diseño de puentes atirantados a nivel mundial.

Puentes colgantes y atirantados

Estos dos tipos de puentes tienen en común el uso de cables para la suspensión de la superestructura. Sin embargo, mientras que en los puentes colgantes la carga se distribuye sobre un cable principal longitudinal que sostiene a los demás cables paralelos, en los atirantados, el esfuerzo se ejerce en el mástil del que los cables están sostenidos.

Los primeros puentes colgantes de la época moderna se hicieron en Estados Unidos y Canadá. John A. Roebling, Charles Ellet Jr. y Leffert L. Buck diseñaron el primero, cerca de las cataratas del Niágara, conocido como *Niagara Falls Suspension Bridge* (1848). Roebling diseñó dos puentes más que también son iconos de sus ciudades: el puente en Cincinnati, Ohio (1866), y el más famoso de todos, el de Brooklyn en la ciudad de Nueva York, concluido en 1883. Cabe decir que en México este tipo de puentes no ha sido una solución común para puentes en vías de comunicación.

Por su parte, en los puentes atirantados el tablero de la superestructura es soportado por tirantes o cables inclinados que se anclan a uno o varios mástiles o torres, los cuales inducen una fuerza axial de compresión en la sección transversal del tablero. En México la era de los puentes atirantados inició con la construcción del puente Coatzacoalcos II, que en el año de 1984 se puso en operación.

De acuerdo con la manera en que los tirantes de estos puentes están anclados al mástil, se identifican de la siguiente manera:

Sistema de abanico ("fan"): Los cables están anclados en lo más alto de las torres, desde un mismo punto. El primer puente moderno, soportado solamente por cables atirantados, es el Strömsund de Suecia, diseñado por Dischinger y construido en 1955 por la compañía alemana Demag. Tiene un tramo principal de 183 m y dos tramos a sus lados de 75m cada uno, con dos planos de cables atirantados que tienen dos pares de cables radiales en forma de abanico.

Sistema de arpa ("harp"): Los cables se colocan de manera paralela. Las componentes horizontales de la tensión en los cables que soportan la viga, cerca de la torre, son más grandes que aquellas que se utilizan en el sistema de abanico. Con este sistema, las torres deben ser más altas y disponer de una mayor inclinación, lo que incrementa la rigidez del sistema. Estéticamente, el sistema de arpa es considerado por muchos como el más estético. En este sentido, sobre el río Rin el ingeniero alemán Theodor Heuss construyó un puente con tramos de 108-260-108 m, con tres series de cables paralelos en cada torre, en cada dirección en dos planos de cables, fijado en tres puntos en lo alto de la torre. En la actualidad, este tipo de configuración se denomina de "arpa".

Sistema de semi-arpa ("semi-harp"): Para evitar el problema del amontonamiento de los anclajes de los tirantes en el ápice de la torre, éstos están espaciados a distancias convenientes en la parte superior de la torre, sin que se llegue a un arreglo paralelo.

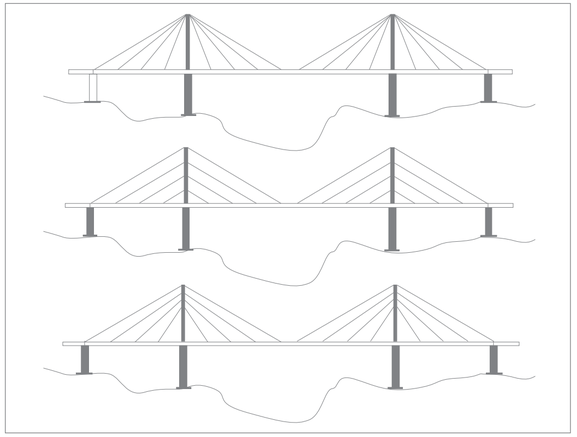
En México, fue construido el primer atirantado de más 500 metros en el año de 1983 en el puerto de Coatzacoalcos, nombrado también como puente "Ingeniero Antonio Dovalí Jaime", se consideró en su época como una de las 10 obras más importantes del mundo.

Muchos puentes tienen una combinación de varios sistemas constructivos de acuerdo con las condiciones que cada proyecto exija. Una de las ventajas del método constructivo de estos puentes, es que el impacto ambiental queda paliado debido a que la zona de terreno afectada, generalmente se circunscribe a la superficie de desplante de las pilas. Dado que este tipo de estructuras están pensadas para librar claros de gran longitud.

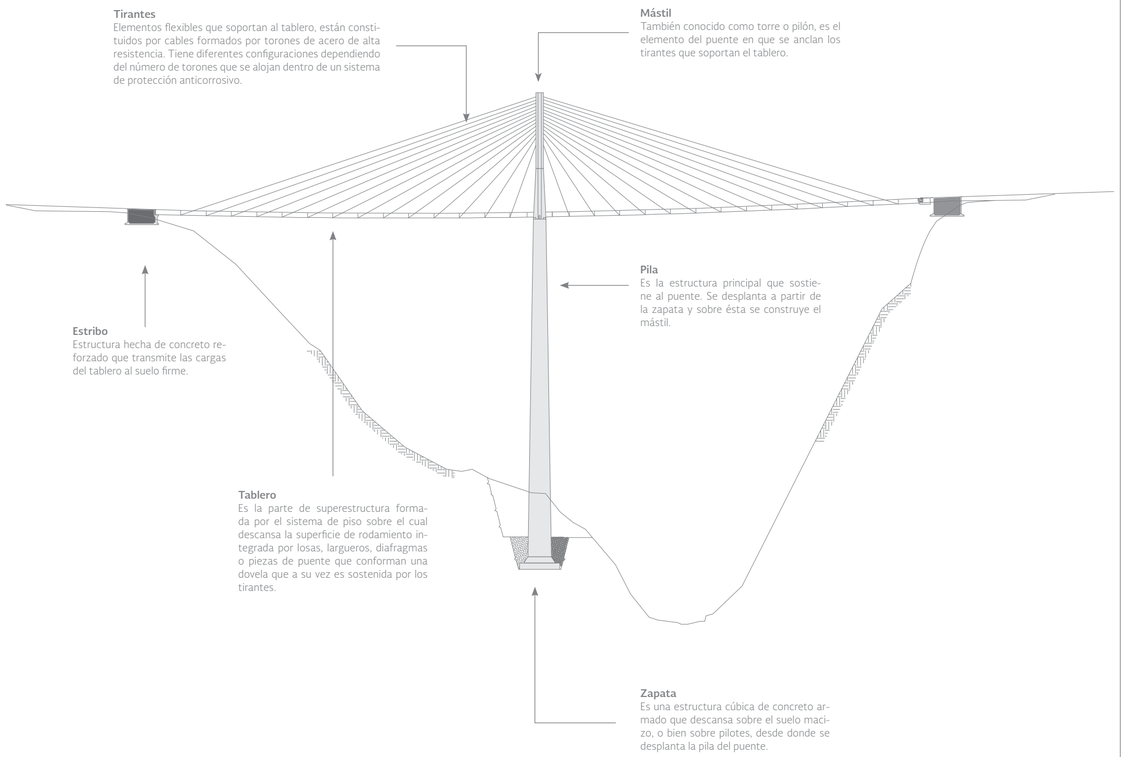
Los métodos más comunes para la construcción de los puentes atirantados son los siguientes:

En voladizo: Las dovelas son coladas *in situ* o prefabricadas, y se izan con grúas que las colocan en su lugar desde los dos extremos del puente.

Con sostenes provisionales: En este caso el puente se construye utilizando apoyos provisionales que sostienen la estructura antes de que los tirantes sean colocados y asuman su función de sostén.

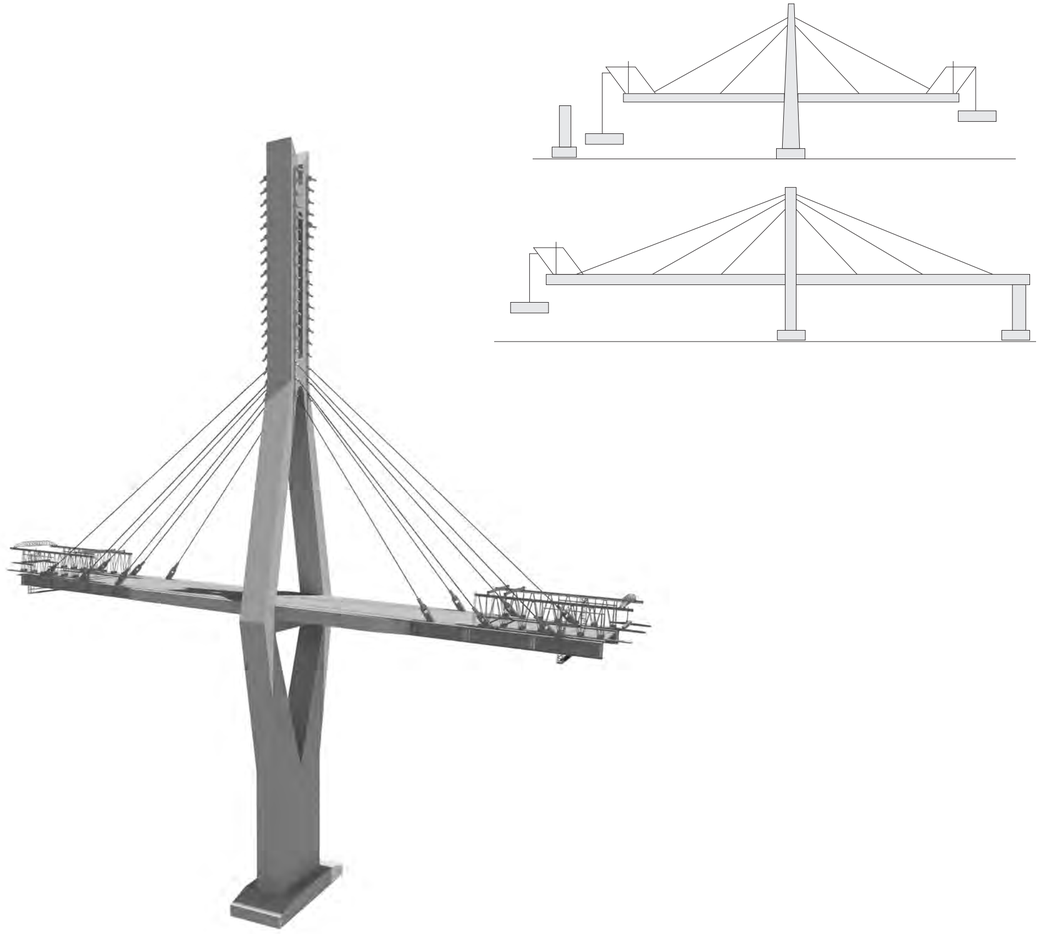


Componentes estructurales



Puente atirantado
Esquema

Proceso constructivo de puentes atirantados



Proceso constructivo con ayuda de cimbras móviles para elementos colados *in situ* y de grúas para elementos prefabricados, a partir de los mástiles se colocan dovelas en voladizo, en forma simétrica o asimétrica. Después de colocada una dovela, se sostiene por su tirante respectivo.

Arriba: Puente sobre el río Caroní, en Venezuela. Abajo: Viaducto La Marquesa, México. **Página anterior:** *Puente Coatzacoalcos II*. Este puente inaugura en México la construcción de puentes con claros largos sostenidos con tirantes y construidos a base de dovelas individuales izadas.

Puentes empujados

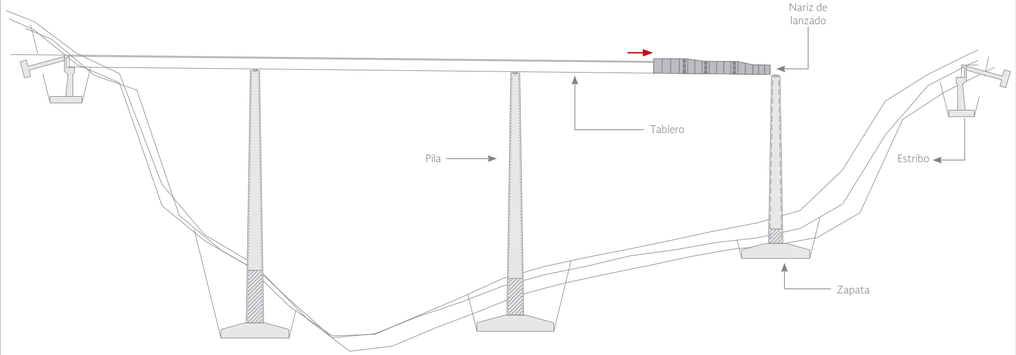
En realidad no existen los puentes empujados; se trata más bien de un método de montaje para estructuras fabricadas *in situ*, o prefabricadas que son llevadas al sitio de construcción. Esta técnica es la más reciente ya que el primer puente que se construyó con este método es el que cruza el río Caroní, entre Venezuela y Guyana, en el año de 1964. Con un claro de 90 metros, fue diseñado por los ingenieros alemanes Will Baur y Fritz Leonhardt. Estas estructuras son construidas en uno o ambos extremos del obstáculo a librar, para después ser empujados con distintos métodos hasta sus apoyos finales. Este método de montaje en una buena solución para minimizar trastornos al medio ambiente.

En México, en 1980 se construyó el primer puente de este tipo en Tula, Hidalgo, para la Dirección General de Vías Férreas. Cuatro años después, en 1984, fue concluido el puente Badiraguato en la carretera Culiacán-Hidalgo del Parral; el primero, supervisado por la Dirección General de Carreteras. Con esta obra inició en nuestro país la era de este tipo de procedimientos en la construcción de puentes. En 1987, fue levantado el primer puente de gran envergadura con este método: el Viaducto La Marquesa, localizado en la entonces nueva autopista México-Toluca en el municipio de Huixquilucan, Estado de México. El poder librar la cañada que atraviesa, permitió una reducción de más de 30% en los tiempos de recorrido del Distrito Federal hasta la capital mexiquense.

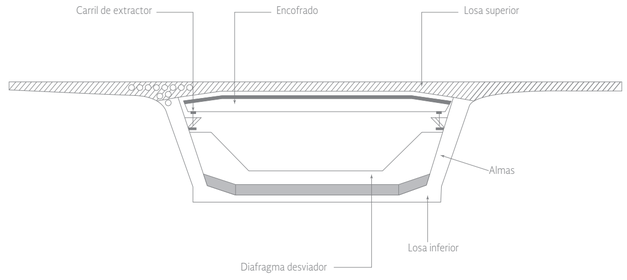
Esta técnica consiste en ir empujando la estructura sobre apoyos definitivos o provisionales, desde un parque donde se construyen las dovelas a lo largo de un dispositivo de lanzamiento que, por medio de gatos hidráulicos, en dos movimientos consecutivos, levanta y empuja. Cuando no es posible el uso de apoyos provisionales, se recurre a una torre articulada con tirantes que son anclados para soportar las dovelas frontales hasta su posición final sobre las pilas que lo soportarán, con el apoyo en ambos casos, de una nariz frontal de lanzado que ayuda a la estructura a sostener voladizos importantes y a recuperar las deformaciones verticales por peso propio por medio de gatos hidráulicos.

Las superestructuras de acero empujadas están constituidas por vigas de sección abierta, de alma llena, formadas por placas soldadas. Una losa de concreto reforzado constituye la calzada. También pueden utilizarse estructuras empujadas formadas por un cajón de acero. En ese caso, la porción empujada será un cajón cerrado o una sección "U" provista de patines superiores.

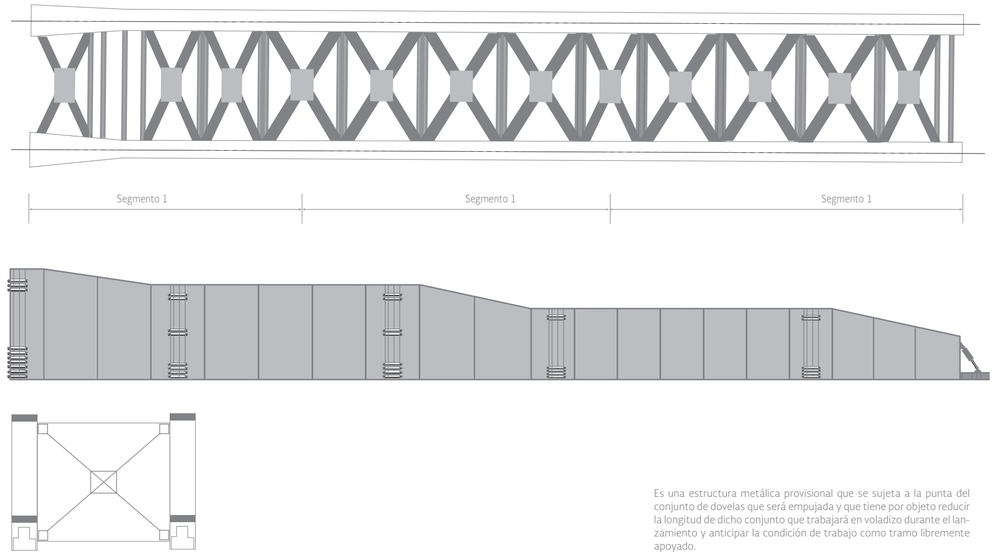
Puente empujado
Esquema



Sección tranversal de dovela



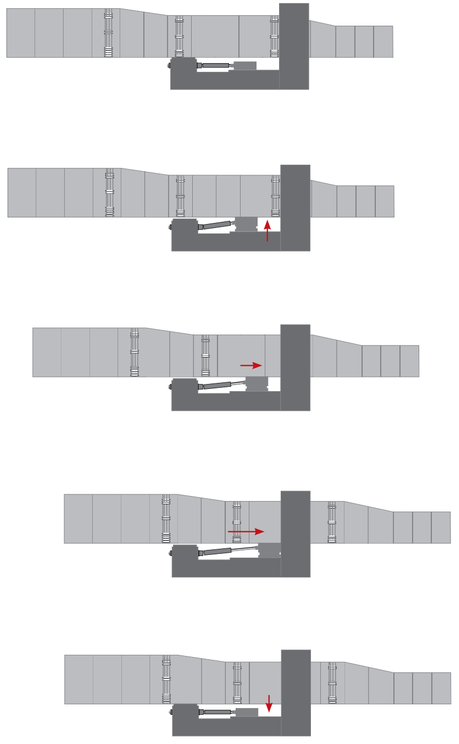
Nariz de lanzado



Es una estructura metálica provisional que se sujeta a la punta del conjunto de dovelas que será empujada y que tiene por objeto reducir la longitud de dicho conjunto que trabajará en voladizo durante el lanzamiento y anticipar la condición de trabajo como tramo libremente apoyado.

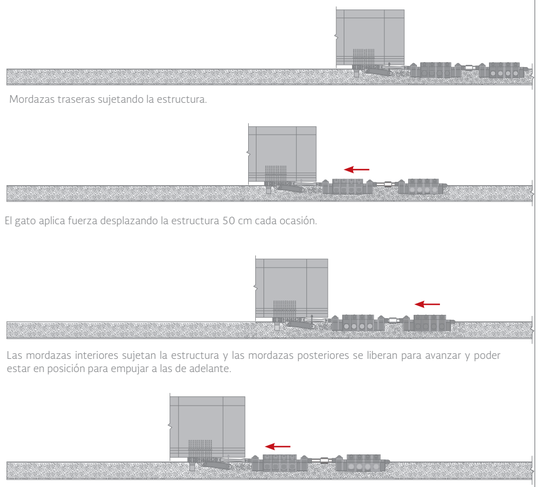
Sistemas de empujado para puentes de dovelas de acero y concreto

Levantamiento y empuje



Los equipos modernos de empuje se componen de un cilindro vertical que levanta el puente, y que lo empuja. El cilindro vertical asciende 4 o 5 mm, con lo que recibe una gran carga vertical y en consecuencia transmite una carga horizontal por el rozamiento que existe con el concreto.
A continuación se ponen en marcha los cilindros horizontales que empujan hacia adelante movilizando al conjunto cilindro vertical más puente, del orden de 25 cm. Al terminar este ciclo el cilindro vertical desciende, se libera del puente y el conjunto horizontal se retrae llevando consigo al cilindro vertical.
Este ciclo tarda aproximadamente 2 a 5 minutos y el lanzamiento de una dovela del puente de 20 m es del orden de 3 horas.

Empuje posterior



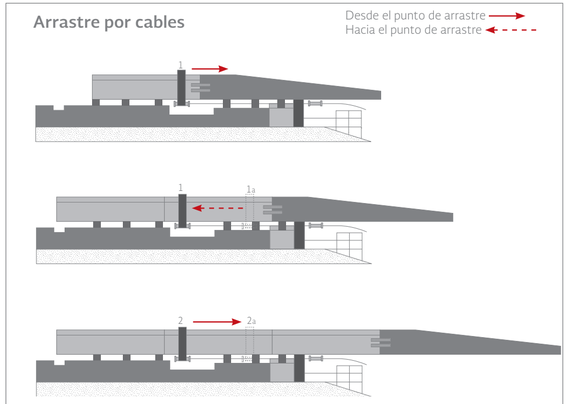
Mordazas traseras sujetando la estructura.

El gato aplica fuerza desplazando la estructura 50 cm cada ocasión.

Las mordazas interiores sujetan la estructura y las mordazas posteriores se liberan para avanzar y poder estar en posición para empujar a las de adelante.

Se recuperan y se repite el ciclo en series de ocho empujados para desplazar los 4 m que recorre el carro de empuje con la estructura levantada.

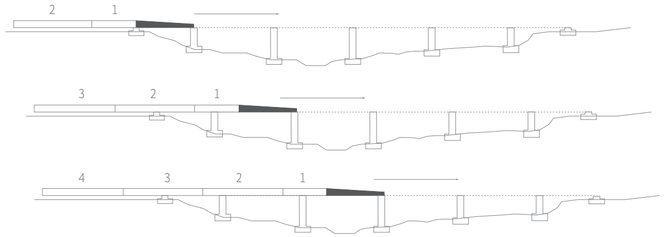
Arrastre por cables



Se utilizan gatos hidráulicos y barras de acero o cables de presfuerzo anclados a la losa inferior de la superestructura. Los gatos se apoyan contra la cara del estribo más cercano al patio de prefabricación y desde ahí se jalan las barras o cables.

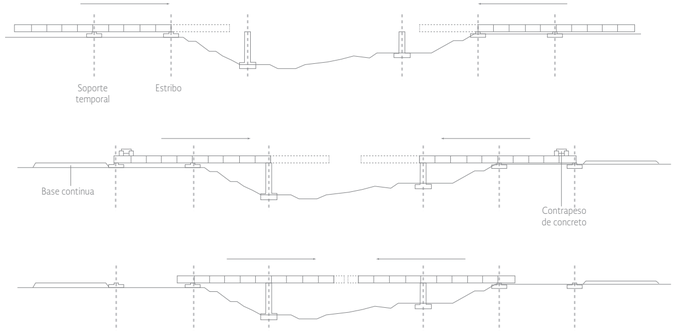
Procesos de empujado para puentes de dovelas de acero y concreto

Lanzamiento dovela por dovela



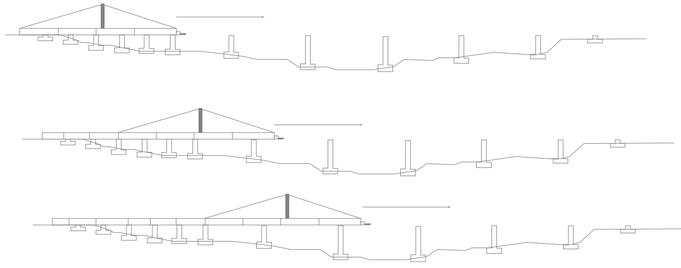
Cada dovela se ensambla a la dovela anterior en una plataforma localizada por detrás del estribo de una margen o una ladera. Una vez que la nueva dovela queda unida a la anterior, el conjunto se empuja hacia adelante para liberar el sitio que ocupará otra dovela más. El empujado se realiza por etapas sucesivas hasta alcanzar el apoyo definitivo que lo sostendrá.

Lanzamiento de estructuras completas

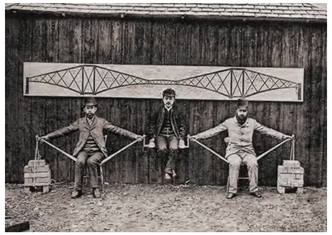


En este caso las dovelas que forman la superestructura completa se construyen en el patio de lanzado y después la superestructura es empujada como una sola pieza hasta la posición final. Es común hacerlo desde cada lado del puente.

Lanzamiento con el uso de atirantamiento provisional



Se coloca un sistema provisional de soporte consistente en una torre articulada en su base, en la unión con el tablero en la que anclan tirantes en abanico que soportan a las dovelas frontales. Ésta se retira cuando la superestructura haya alcanzado el apoyo definitivo donde descansará.



Puentes en doble voladizo

Este proceso constructivo se inició con estructuras de metal a finales del siglo XIX. El primer puente hecho en doble voladizo se construyó en Hassfurt, Alemania, sobre el río Meno en 1867. Heinrich Gerber lo diseñó con un claro de 130 m. Sin embargo, el primer gran puente construido con esta técnica es el *Firth of Forth* (Fiordo de Forth) en Escocia entre los años de 1882 y 1890; con un claro de 521 m, y hecho con una pesada estructura tubular de metal. Fue diseñado por Thomas Bouch, John Fowler, Benjamin Baker y Allan Stewart. Asimismo, en 1917 se construyó el puente Quebec sobre el río San Lorenzo, también de acero, bajo la supervisión de H. E. Vautelet y Maurice FitzMaurice.

En 1957 inició la era de los dobles voladizos tanto en México como en América Latina, con la construcción del puente sobre el río Tuxpan, Veracruz. Este puente tiene claros de 92 m y articulaciones metálicas de tipo Gerber al centro de los claros. El concreto fue presforzado con barras de acero. La falta de experiencia en este tipo de construcciones trajo problemas que retrasaron la conclusión del proyecto. Sin embargo, una vez dominada la técnica el puente avanzó con su ritmo de construcción de una dovela cada 10 días. Es de hacer notar cómo este proceso constructivo contribuyó al mejoramiento del diseño de puentes de ahí en adelante.

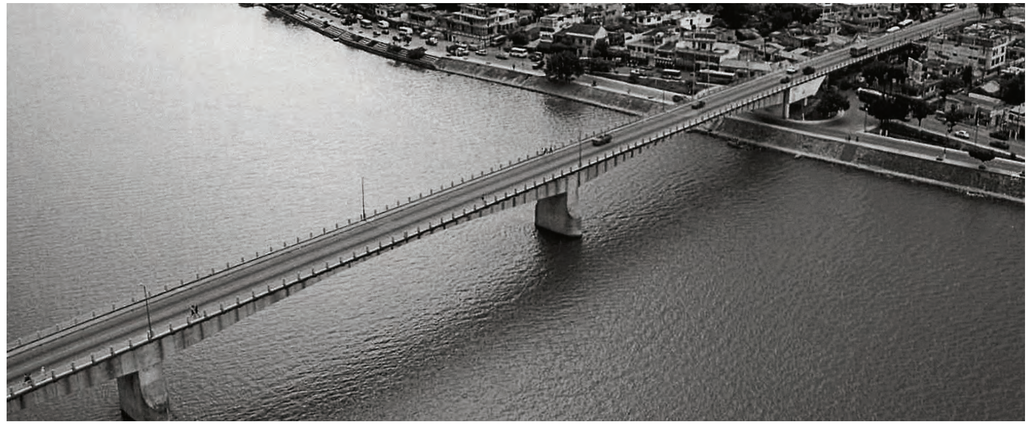
Su estructura consiste en dos apoyos sobre el lecho del río y la línea que forman los voladizos se va adelgazando hacia el centro, generando una estética sensación de ligereza. De ahí en adelante el doble voladizo ha sido una de la técnicas más usadas como por ejemplo, en los puentes Papagayo, San Marcos, Pueblo Nuevo, Viaducto Xalapa y en el Barranca del Diablo.

Las consideraciones que se toman en cuenta para seleccionar el procedimiento constructivo son las siguientes: los puentes construidos por el sistema de dovelas en voladizo normalmente son adecuados para claros comprendidos entre 60 y 200 metros.

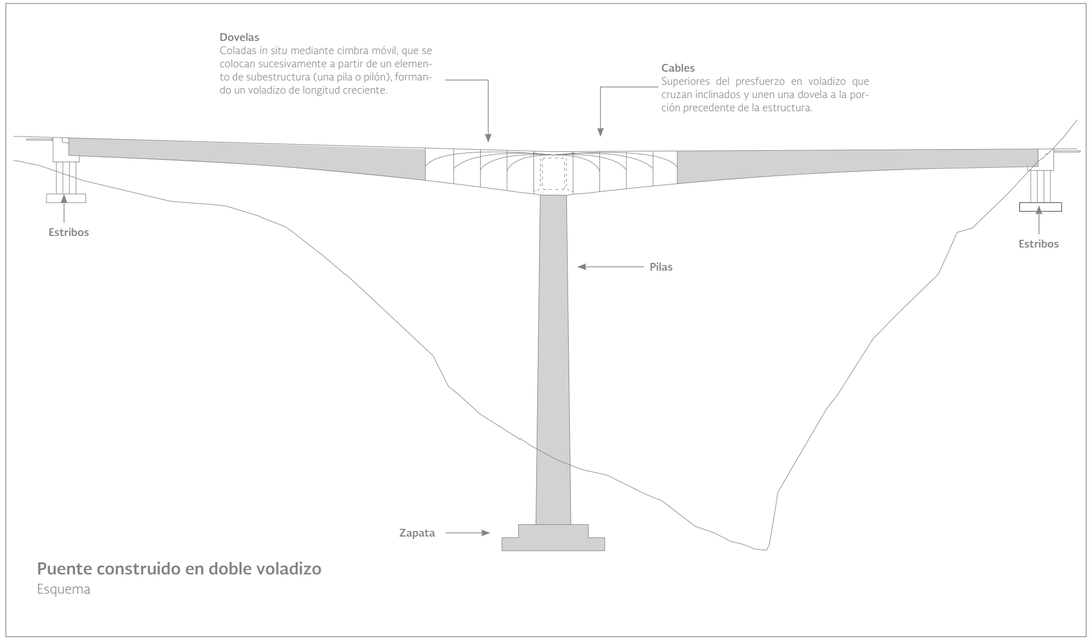
Estos puentes tienen una superestructura hecha con segmentos o dovelas prefabricadas o coladas *in situ* mediante cimbra móvil. Éstas se colocan sucesivamente a partir de una pila de la subestructura, formando así voladizos longitudinales en dirección horizontal creciente, hasta encontrarse con el extremo de otro voladizo que parte de otra pila de la subestructura adyacente; o bien, hasta apoyarse en un estribo o en alguna estructura provisional. Cabe decir que los puentes construidos con este procedimiento, generalmente utilizan cables de presfuerzo longitudinal; en tanto que el uso de presfuerzo transversal se utiliza en puentes anchos con voladizos de losa importantes. El concreto que forma las dovelas puede ser de masa normal aligerada.

Pueden ser en doble voladizo cuando se construyen a partir de una pila y el avance se realiza en forma simétrica respecto a la misma; o en voladizo sencillo, cuando se construyen a partir de un estribo y se dispone de un elemento de anclaje o de un contrapeso para el equilibrio de momentos en torno a ese estribo.

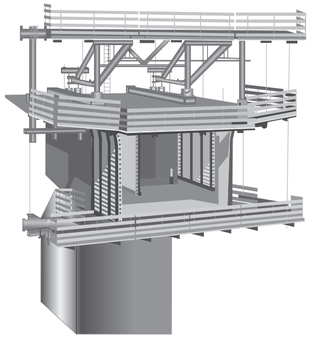
Arriba izquierda: Para explicar el principio de los puentes en doble voladizo, Benjamín Baker llevó a cabo el siguiente experimento para demostrar su técnica. En la foto, los dos hombres de los extremos hacen el trabajo de las pilas. A los lados, los atados de tabiques representan las pilas de anclaje. Los brazos abiertos de los hombres están sostenidos por palos de madera que a su vez están anclados a los tabiques. Esto permite sostener al hombre sentado en la silla debido al balance de fuerzas. **Abajo:** El puente Forth, construido en Escocia, es considerado parte del patrimonio histórico de ese país. Su estructura de acero sigue sorprendiendo, no obstante haber sido construido hace muchos años. **Arriba derecha:** El puente Quebec, sobre el río San Lorenzo, llegó a ser el más largo construido con la técnica del doble voladizo, hasta ser desplazado por el puente Ambassador en 1929. Después de colapsar dos veces, se acabó de construir en 1919; sigue en uso.



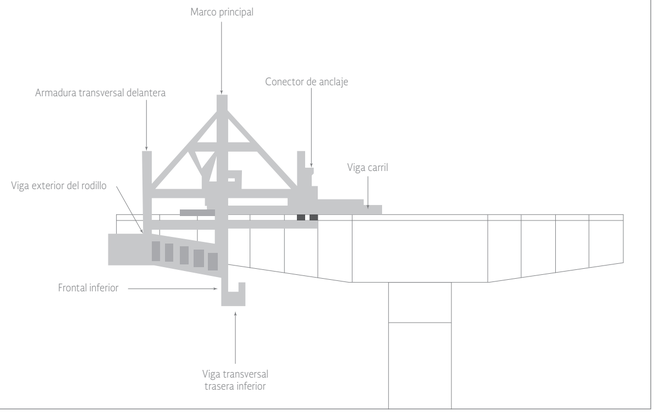
Arriba: El puente Tuxpan, construido a partir 1957, es el primer puente en doble voladizo en México y en Latinoamérica. Une la zona conurbada de Poza Rica-Papantla, por encima del río Tuxpan. **Abajo:** La autopista México-Tuxpan forma parte de uno de los corredores carreteros que mayor impulso económico traerá al país. El viaducto San Marcos es una de las estructuras más imponentes de esa supervía, junto a varios puentes, entre ellos el Texcapa. Su pila es la más alta de México, con mayor altura que la Torre Mayor de la Ciudad de México.



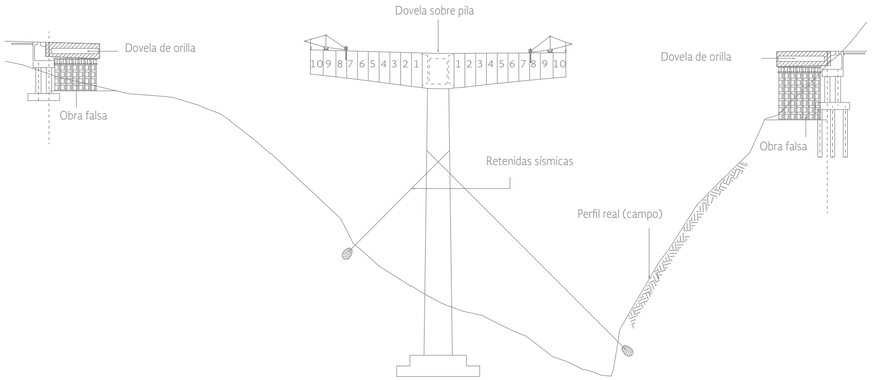
Puente construido en doble voladizo
Esquema

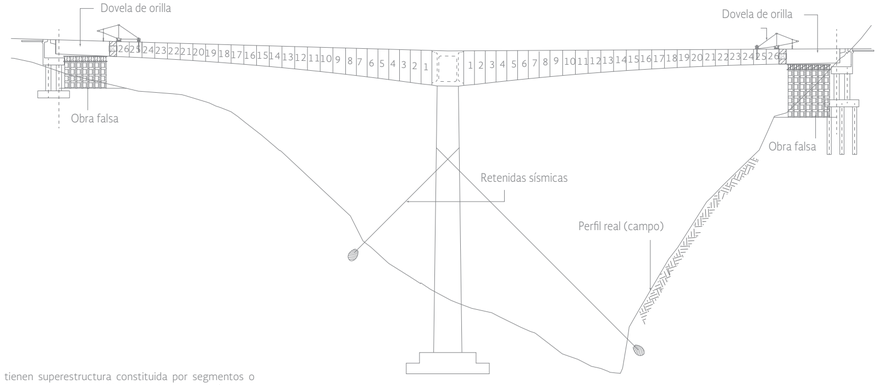


Sistemas de cimbras autodesplazantes



Doble voladizo





Estos puentes tienen superestructura constituida por segmentos o dovelas prefabricadas o coladas en sitio mediante cimbra móvil, que se colocan sucesivamente a partir de un elemento de subestructura, formando un voladizo de longitud creciente, hasta encontrarse con el extremo de otro voladizo que parte de un elemento de subestructura adyacente o hasta apoyarse en un estribo o en un apoyo provisional. Pueden ser en doble voladizo cuando se construyen a partir de una pila y el avance se realiza en forma simétrica respecto de ese elemento, o en voladizo sencillo cuando se construyen a partir de un estribo y se dispone de un elemento de anclaje o de un contrapeso para el equilibrio de las cargas en torno a ese estribo.

Izquierda: El puente Coatzacoalcos I fue el primer puente que usó trabe de concreto presforzado en México. Inaugurado durante el gobierno del presidente Adolfo López Mateos, une el estado de Veracruz con el de Tabasco. Además, es un puente levadizo con un sistema de izado en su segmento central, para permitir la navegación. **Arriba derecha:** De los primeros puentes de trabes más sobresalientes está el puente Walnut Lane Memorial, en el estado de Filadelfia de la Unión Americana. En éste se usaron vigas de concreto de 50 metros. Con esta obra quedó inaugurada la era de los puentes más populares para uso urbano en el mundo. **Abajo derecha:** Muchos puentes de la autopista Durango-Mazatlán están hechos con vigas aashto y Nebraska presforzadas de concreto, coladas *in situ*. Dadas las difíciles condiciones de acceso, se utilizaron sistemas de lanzado muy efectivos para la construcción de estas estructuras.

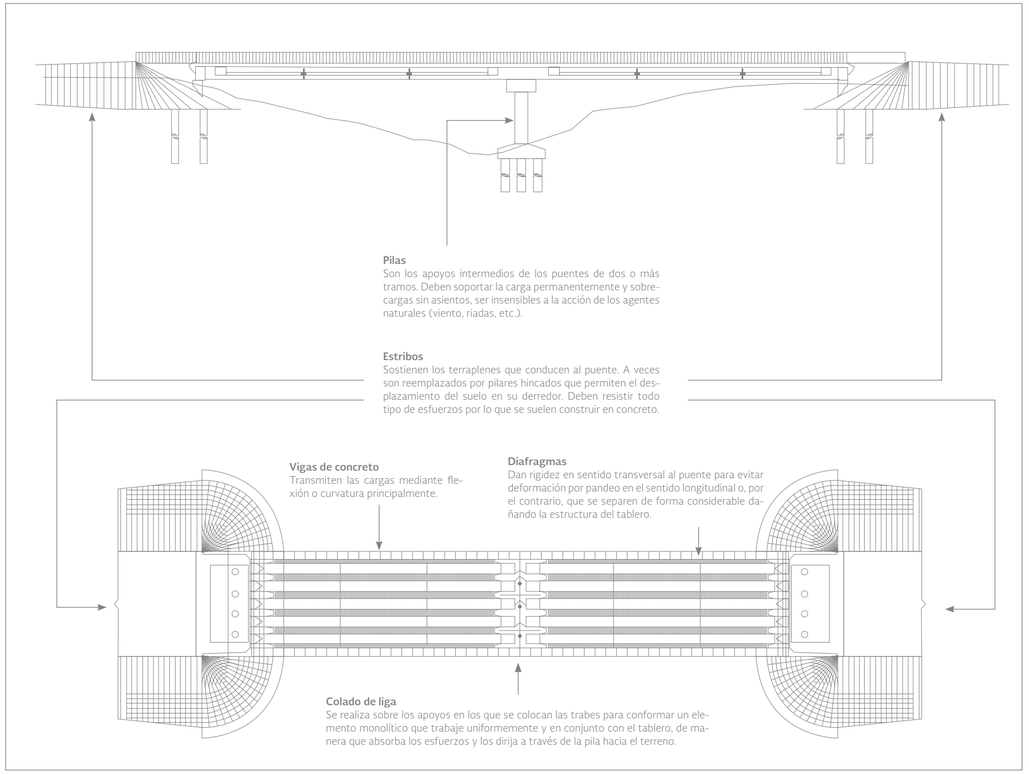
Puentes de trabes de concreto presforzado

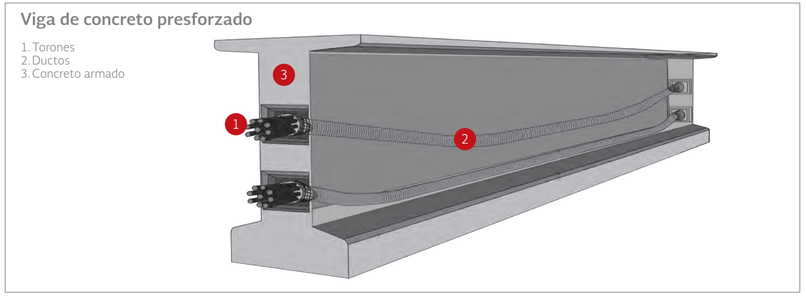
No se puede pensar en este tipo de estructuras sin hacer una referencia al concreto postensado o pretensado que se usa en la construcción, desde finales de la década de los años veinte del siglo xx. El principio mecánico del concreto presforzado fue puesto en práctica por ingenieros franceses, donde el material es sometido a compresión por medio de cables longitudinales lo que aumenta de manera considerable su resistencia a cargas muertas y vivas. Este producto ha sido utilizado en todo tipo de construcciones: losas de concreto en edificios, hangares de grandes dimensiones, pilas de concreto para cualquier tipo de soporte, vigas para puentes, entre otras obras.

Las vigas de concreto presforzado se fabrican *in situ* o son hechas en plantas y luego transportadas para su colocación sobre los cabezales de las pilas de puentes que las sostendrán.

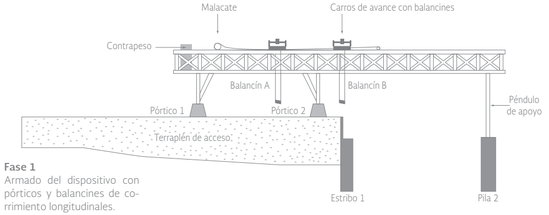
Este tipo de vigas son estructuras más ligeras y económicas para puentes de hasta 50 m de claro. Son los más utilizados en el mundo dado que su construcción es relativamente sencilla en zonas de fácil acceso, donde no se requiere de maquinaria especializada. Sin embargo, pueden llegar a ser la mejor solución en zonas de difícil acceso lo cual obliga al uso de maquinaria de montaje (lanzadoras de vigas). En el caso de la autopista Durango-Mazatlán, este tipo de estructuras fueron utilizadas con frecuencia en puentes como el Santa Lucía y La Cascada, donde su construcción requirió de un parque para la fabricación de las vigas, así como de su traslado hasta la zona de lanzado fue con camiones y *dollies*.

El *Walnut Lane Memorial Bridge* de Philadelphia fue el primer puente de vigas de concreto presforzado construido en Estados Unidos en el año 1950; con una longitud de claro de 50 m y un peso de 150 toneladas en cada una de las vigas. En México, el primer puente que usó esta tecnología fue el Coatzacoalcos I; un híbrido levadizo para el tránsito marítimo con una longitud de 1 km, que empezó a construirse en 1957 y se puso en funcionamiento en 1962. Otro ejemplo digno de mencionar es el del puente La Unidad, construido en Campeche y que une a Isla del Carmen con la península de Yucatán. Durante muchos años fue el puente más largo de México con una extensión de 3 260 metros.

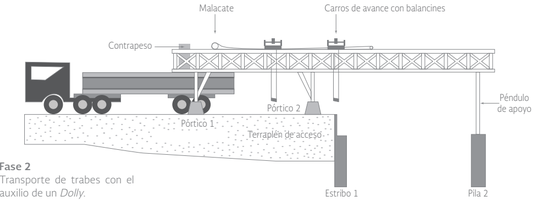




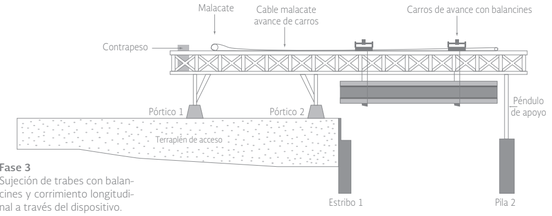
Proceso de montaje*



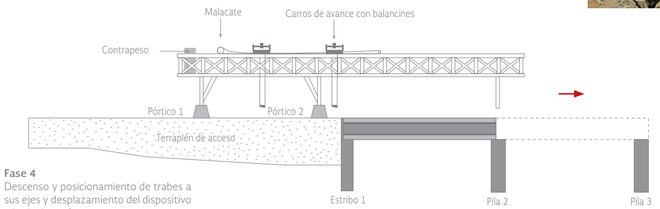
Fase 1
Armado del dispositivo con pórticos y balancines de corrimiento longitudinales.



Fase 2
Transporte de trabes con el auxilio de un *Dolly*.



Fase 3
Sujeción de trabes con balancines y corrimiento longitudinal a través del dispositivo.



Fase 4
Descenso y posicionamiento de trabes a sus ejes y desplazamiento del dispositivo a la siguiente fase.

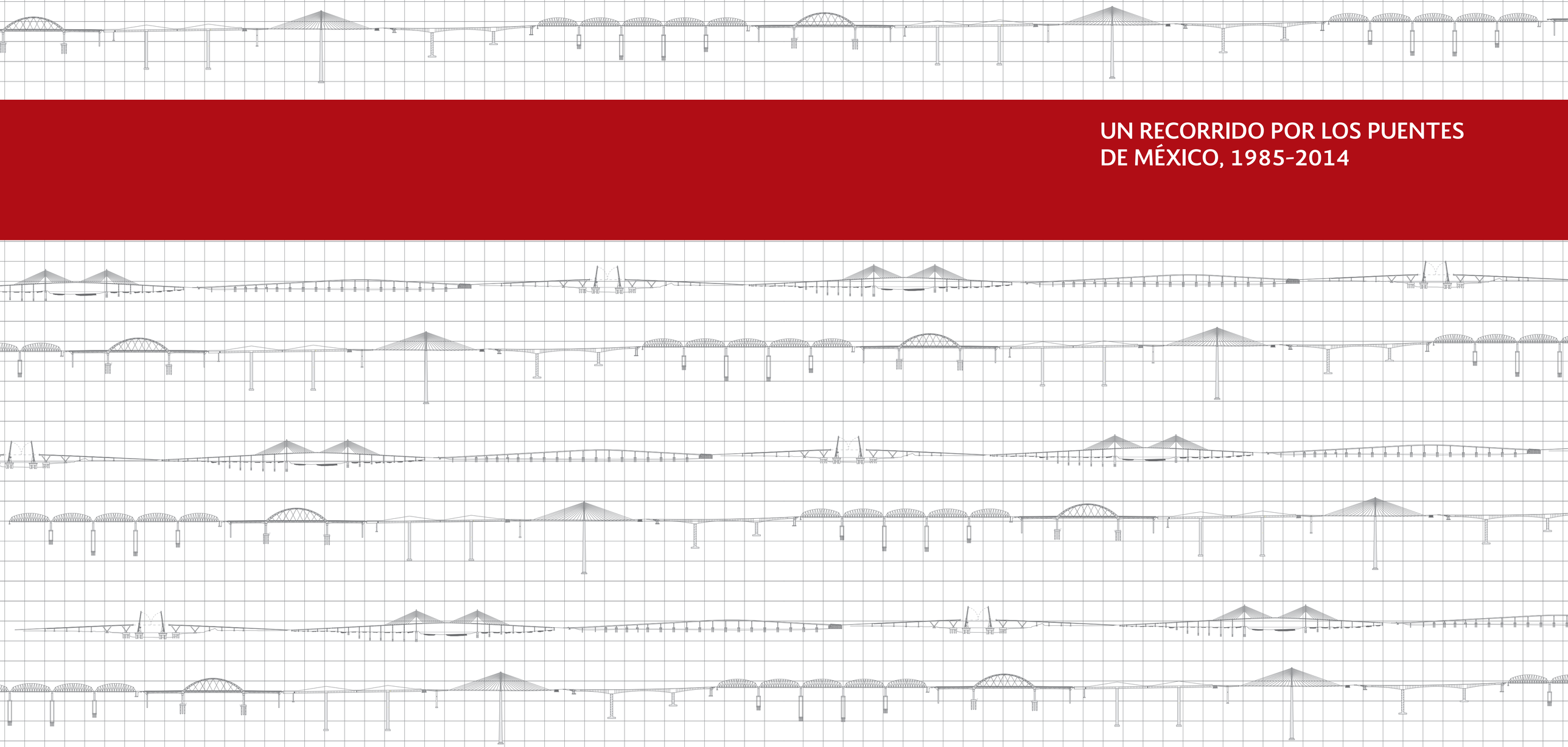
Sistema de lanzado de trabes de concreto presforzado

Sistema diseñado a partir de un dispositivo que consta de una estructura metálica a base de módulos, que permite tomar directamente trabes desde el vehículo de carga, al desplazarse longitudinal y transversalmente hasta colocarlas en su lugar definitivo.

Este sistema de montaje es utilizado en lugares inaccesibles por su altura, topografía o cauces de ríos. Recomendado para el montaje de trabes de concreto y metal de dimensiones de 30 hasta 50 m y un peso hasta de 150 toneladas.

*Tomado de Mexpresa

UN RECORRIDO POR LOS PUENTES DE MÉXICO, 1985-2014



Viaducto La Marquesa
1987

EJE TRONCAL
México-Nogales

AUTOPISTA
México-Toluca

UBICACIÓN
México-Toluca
Km 006+370

ESTADO
Estado de México

TIPO DE PUENTE: Empujado/Trabes

LONGITUD TOTAL: 330 m

No. DE APOYOS: 7

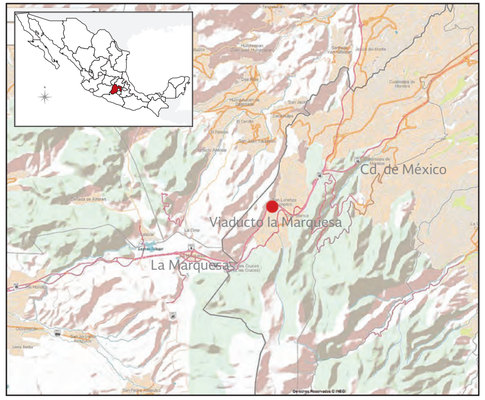
No. DE CLAROS: 6

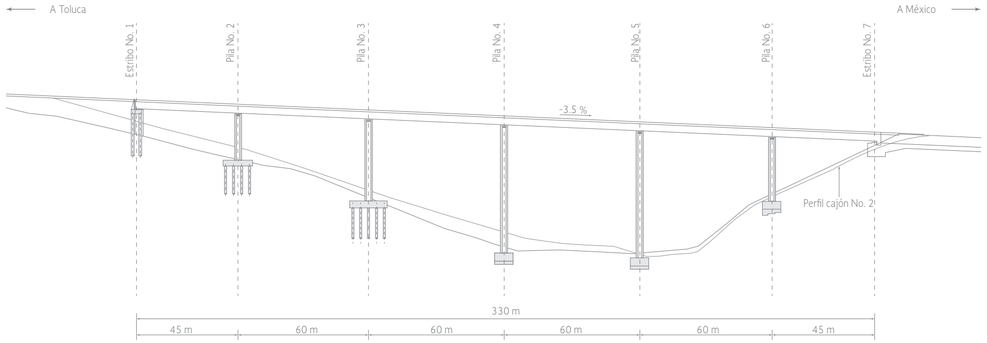
CLARO MÁXIMO: 60 m

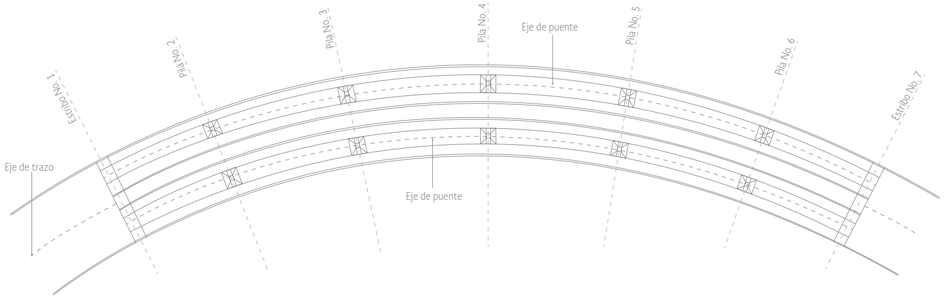
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 56.35 m

ANCHO TOTAL: 16.90 m

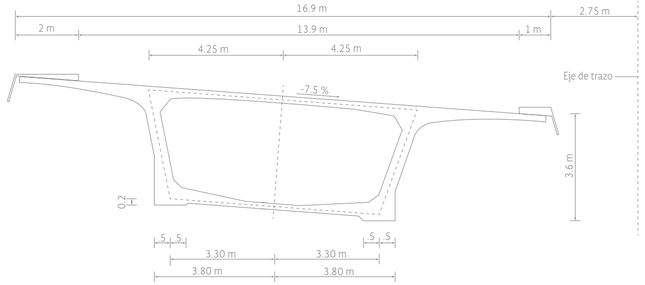
No. DE CARRILES: 3 en cada cuerpo

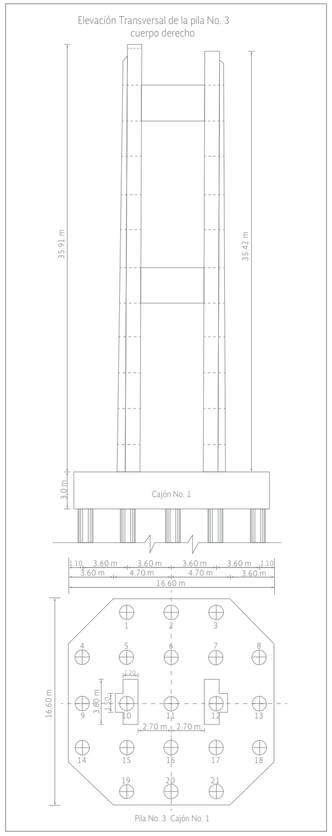






Sección transversal





Arriba izquierda: Para la cimentación se utilizaron zapatas de concreto reforzado en las pilas 4, 5 y 6, mientras que en los estribos 1 y 7 y en las pilas 2 y 3 del viaducto se resolvió con pilotes colados en el lugar. El esquema muestra la elevación transversal del apoyo No. 3, el diseño de la cimentación y la distribución de los pilotes en ambos cuerpos. **Arriba derecha:** Construcción de la superestructura de forma paralela. Para el sistema de empujado con trabes se colocó al frente de la primera dovela la nariz de lanzamiento que medía 36 m; es decir, 60% de la longitud total del claro mayor. La maniobra de empuje se realizó con gatos de doble acción, tanto de empuje y retroceso, como de elevación y descenso.

En el año de 1968 se iniciaron los estudios para llevar a cabo las obras de modernización de la carretera México-Toluca, específicamente del tramo La Venta-La Marquesa, en la que se aplicaron especificaciones de tipo autopista: menor grado de curvatura y pendiente, mayor amplitud, mayor longitud de visibilidad y en consecuencia, mayor velocidad con un alto coeficiente de seguridad.

A finales de la década de los años ochenta, debido al considerable desarrollo industrial y comercial de la ciudad de Toluca, así como a su cercanía con el Distrito Federal, se empezaron los trabajos para mejorar esta vía. El puente Viaducto La Marquesa fue incluido en el proyecto de modernización de la carretera México-Toluca, donde también se contempló la construcción del túnel La Venta.

El puente Viaducto La Marquesa fue puesto en operación en 1987; es de los primeros construidos con el Sistema de Lanzamiento por Incrementos Sucesivos en México, junto con el puente Río Tula, en Hidalgo. Introduciendo esta tecnología, se inició una nueva época de apertura a los sistemas modernos en la construcción de puentes.

Para el funcionamiento de este sistema se realizó un parque de fabricación para la construcción de dovelas que posteriormente son empujadas, el cual se localizó en el acceso del estribo No. 7 ya que era el de menor elevación. También en este sistema se utilizó una nariz de lanzamiento de 37 m de longitud; la finalidad de esta nariz eran disminuir los momentos que se generan cuando la sección cajón de la superestructura se encuentra en voladizo.

También se recurrió a apoyos provisionales en las pilas, para las maniobras de lanzamiento, los cuales fueron reemplazados por apoyos encasetonados definitivos, al tener la superestructura en su posición final.

Estudios preliminares

De acuerdo con las características geológicas del sitio, la zona donde se ubicó el puente está conformada por escurrimientos glaciares conocidos comúnmente como morrenas, y aunque sus estratos son muy variables en distancias muy cortas se pudo observar que en el área donde se ubicaron los elementos de apoyo predominan los boleos empacados en arcilla café clara, a café oscura de mediana compacidad, en donde los espesores de sus estratos varían entre 12 y 20 m. Estos estudios ayudaron a definir con certeza una cimentación profunda con base en pilotes colados en el lugar, y de pilotes de concreto reforzado para los apoyos 1, 2 y 3 y una cimentación superficial para los apoyos 4, 5 y 6.

Para poder iniciar la obra se realizaron caminos de acceso que comunicaron los estribos del puente y cada uno de los apoyos intermedios, permitiendo así el tránsito a través de la barranca a todo el equipo necesario en cada frente de trabajo. Asimismo, el camino de acceso pudo ser utilizado para transportar al personal y a los materiales de construcción.

Cimentación

La cimentación para el estribo 1 y para las pilas 2 y 3 se resolvió con base en pilotes colados en el lugar, de un diámetro de 1.20 m y de 16 a 26 m de profundidad. Las pilas 4, 5 y 6 se desplantaron por superficie con zapatas de concreto reforzado, con una resistencia de 250 kg/cm². La separación entre pilotes es de 3.60 m en ambos sentidos de sus ejes.

Antes de proceder al colado del concreto fue necesario efectuar una cuidadosa limpieza del fondo de la perforación, eliminando los azolves o recortes sedimentados.

Para el apoyo de las zapatas de la pila No. 2 se hincaron 32 pilotes, 16 de ellos para el apoyo de la zapata de la pila del cuerpo izquierdo y los otros 16 para el apoyo de la zapata de la pila del cuerpo derecho, teniendo éstos una longitud variable cuyo valor máximo es de 21.00 m. En el caso del apoyo de las zapatas de la pila No. 3 se hincaron 42 pilotes: 21 para el apoyo de la zapata de la pila del cuerpo izquierdo y los otros 21 para el apoyo de la zapata de la pila del derecho; este último apoyo tiene la mayor longitud de pilotes que es de 26 m. Para el apoyo No. 4 se construyeron dos zapatas de sección cuadrada, una para la pila del cuerpo izquierdo y otra para la del derecho. Las dimensiones de cada una de ellas son: 3.60 m de altura y 13.50 m de lado.

Para el apoyo de la pila No. 5 se construyeron también dos zapatas de sección cuadrada, una para cada cuerpo de pila. Las dimensiones de cada una de las zapatas de este elemento son de 3.60 m de altura y 14.00 m de lado. Finalmente, para el apoyo de la pila No. 6 se construyeron dos zapatas: una para el cuerpo izquierdo y otra para la pila del cuerpo derecho. Las dimensiones son de 3.00 m de altura por 14.00 m de lado.

Subestructura

Cada puente está conformado por dos estribos y cinco pilas intermedias, en la construcción de dichas pilas se utilizó el sistema de cimbra trepadora *Doka*®. El terraplén de acceso del lado de Toluca está confinado con tierra armada y escamas apuntaladas para evitar el deslave del terreno y así darle estabilidad al estribo No. 1.

La subestructura de las pilas 2 a 6 está constituida por dos columnas de concreto reforzado de sección "T", con alturas variables; la menor de 14.50 m (pila No. 2) y la mayor de 56.35 m (pila No. 5), con espesores de 1.20 m y 1.50 m, respectivamente, unidas mediante riostras a cada 15.00 m de altura.

En cada apoyo (estribos y pilas) se localizan apoyos encasetonados unidireccionales y multidireccionales tipo *Tetron* CD.

Superestructura

El puente Viaducto La Marquesa consta de dos cuerpos paralelos, con una separación entre ejes de 22.40 m, con longitud de 340 m el correspondiente al cuerpo izquierdo y de 320 m el del cuerpo derecho. Cada cuerpo tiene un ancho total de 16.90 m para alojar tres carriles de circulación en cada dirección, así como acotamientos laterales y una banqueta peatonal. El viaducto se localiza sobre una curva en el eje de trazo de 3° 15' y tiene una pendiente longitudinal de 3.5 por ciento.

La superestructura está formada por dovelas de concreto presforzado de sección cajón con almas inclinadas, coladas en longitudes de 20 m y de 3.60 m de peralte, con un ancho de 16.90 m y pendiente transversal de 7.5%, concéntricas con el eje de trazo y dejando un claro libre entre ellas de 5.50 m en planta.

Para el presfuerzo de la sección cajón se utilizó un sistema de 10 cables longitudinales formados cada uno por 19 torones de ½" de diámetro.

Detalle de la estructura metálica utilizada en el Sistema de Lanzamiento por Incrementos Sucesivos, técnica que comenzó a aplicarse a mediados de la década de los ochenta. La modernización de la carretera México-Toluca fue un proyecto destacado que también incluyó la construcción del túnel carretero La Venta, sin olvidar la corrección del alineamiento vertical y horizontal, en el que la pendiente máxima fue de -5%, y el grado máximo de curvatura de 4%, para una velocidad de 90-110 km/h. No fue casualidad que en la construcción del viaducto se recurriera al novedoso procedimiento constructivo de empujado; que en las subestructura se usara el sistema de cimbra trepadora, y se recurriera a la tierra armada en el terraplén de acceso a Toluca, tres elementos ahora muy comunes, pero que en ese momento marcaban un hito en la construcción de puentes.

Puente Tampico
1988

EJE CARRETERO
Matamoros-Puerto Juárez

AUTOPISTA
Tampico-Tuxpan

UBICACIÓN
Tampico-Anáhuac
Km 221

ESTADO
Tamaulipas

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 1 543 m

No. DE APOYOS: 21

No. DE CLAROS: 20

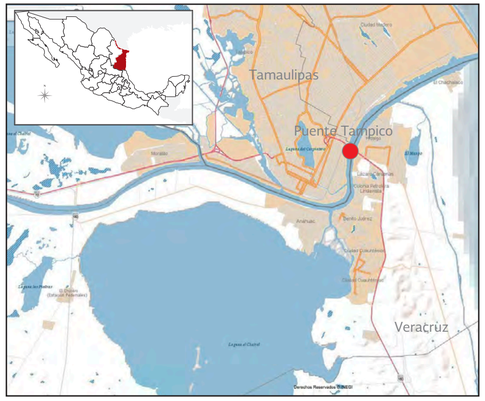
CLARO MÁXIMO: 360 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 48 m

No. DE TIRANTES: 44

ANCHO TOTAL: 18.10 m

No. DE CARRILES: 4



Es un puente atirantado que está ubicado cerca de los límites municipales de Tampico y Ciudad Madero, cerca de la desembocadura del río Pánuco, en el estado de Tamaulipas. El puente tiene una longitud total de 1 543 m; lo componen tres partes: una principal, de tipo atirantado y dos viaductos de acceso.

La primera es de 780 m de largo, con un tramo central de 360 m y a cada lado tres de 70 m. El viaducto de la margen izquierda tiene 522 m de longitud, con cinco tramos de 63 m, tres de 56 m y uno de 39 m; el de la margen derecha es de 241 m con tres tramos de 63 m y uno de 52 metros.

El alineamiento vertical del puente tiene pendientes de -4.85%, en ambos extremos, y el tramo de 360 m se aloja en una curva vertical circular de 3023 m de radio, con lo que se logra un espacio libre vertical entre el nivel del agua y la parte baja de la superestructura no menor de 50 m, para permitir el paso de embarcaciones de gran altura. En planta, entre las pilas 5 y 10 se localiza una curva horizontal de un grado, con una longitud de 306 metros.

Antecedentes y objetivo

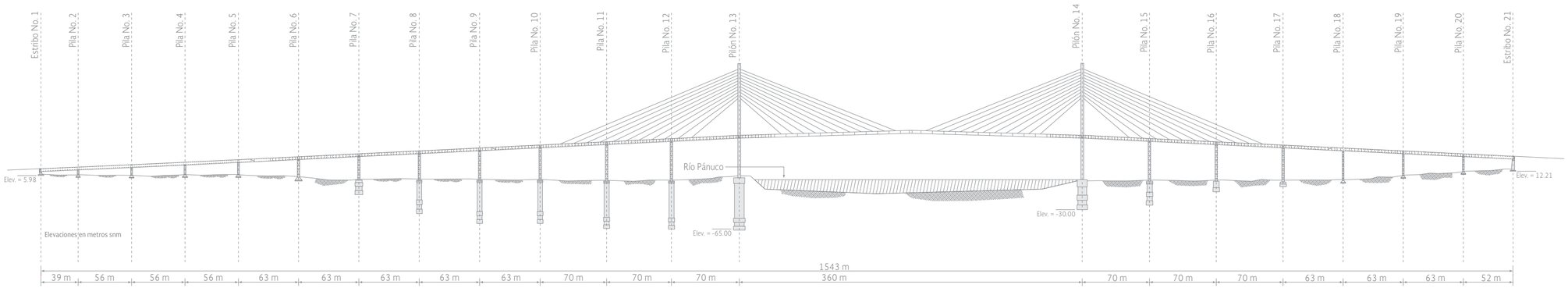
En los años ochenta el desarrollo portuario de la ciudad de Tampico provocó una fuerte activación socioeconómica, que afectó la forma de vida de sus habitantes. Hasta ese momento, el área se había desarrollado sin planificación y por tanto, enfrentaba múltiples problemas económicos, ambientales y sociales, manifestados en déficits de suelo, infraestructura, vivienda, equipamiento y servicios urbanos.

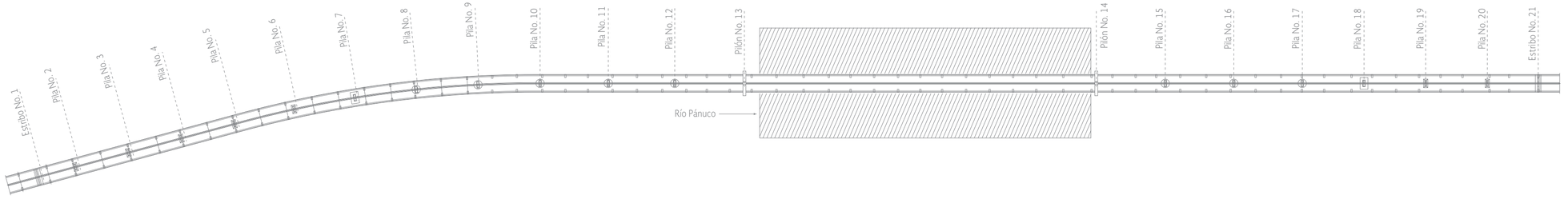
El *Plan de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de la Desembocadura del Río Pánuco*, de 1982 señalaba que la zona adquiriría gran importancia en las siguientes décadas, tanto a escala nacional como internacional, debido al impulso que tendrían sus actividades productivas, y ofrecía para este centro de población, una política de impulso mediante el desarrollo de actividades portuarias e inversiones sectoriales en industria, agricultura, pesca y comercio. Uno de los objetivos fue organizar la estructura interna de la ciudad para relacionar y articular en forma clara y eficiente las dos márgenes del río.

El puente Tampico se ha considerado la obra de ingeniería civil más destacada de la década de los años ochenta, aunque su planeación inició desde la década anterior por el desarrollo urbano previsto en la zona metropolitana de la cuenca baja del río Pánuco. El claro central de 360 m, el tramo principal atirantado de 780 m y una longitud total de 1 543 m, fueron los más largos construidos en nuestro país hasta ese momento. Su diseño y tecnología sirvieron de ejemplo a todo el mundo.

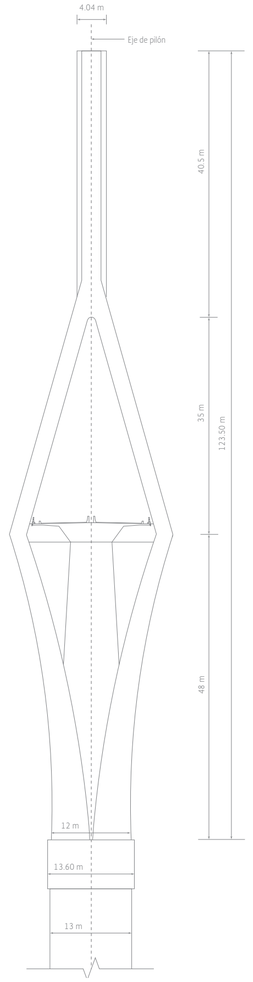
A Tampico

A Mata Redonda

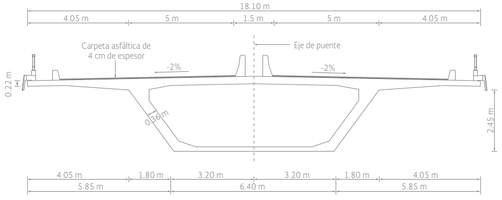




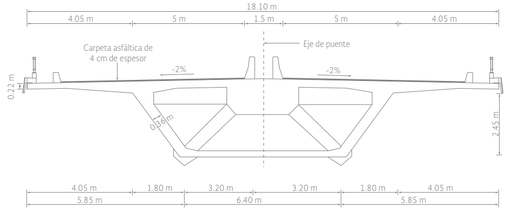
Sección transversal pilones 13 y 14



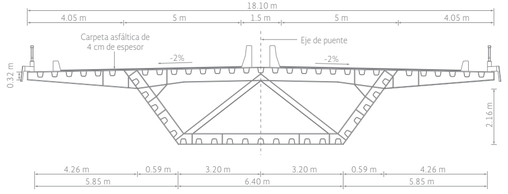
Sección transversal de la superestructura



Sección en anclaje de los tirantes



Sección metálica ortotrópica



El estribo No. 1 junto a las pilas 2 a 10 forman el viaducto que da acceso al puente en la margen Tampico. La construcción de esta importante estructura dio inicio en 1980 y concluyó en 1988. Debido a su innovador diseño recibió en 1989 el premio español Alcántara, por ser la obra pública más destacada, entre las terminadas de 1988-1989 en el mundo ibérico.

Historia y modificación del proyecto

El problema vial del área metropolitana de la ciudad de Tampico se caracterizaba por la mezcla de tránsito interno y externo en el área urbana central. La vialidad principal estaba constituida en gran parte por los accesos carreteros, lo que se traducía en saturación y permanente deterioro de la escasa vialidad. Los transbordadores que conectaban a ambas márgenes del río Pánuco no eran suficientes ni seguros y al mismo tiempo, aumentaban el problema de las áreas centrales.

Entre los años de 1976 y 1978 se llevaron a cabo estudios de factibilidad para la justificación de la construcción del puente. La entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas hizo análisis y estudios urbanos sobre los posibles sitios de cruce, así como los tipos de estructura más adecuados para lograr salvar el claro requerido por el ancho del río Pánuco.

En estos estudios se consideraron aspectos físicos y sociales como la operación fluvial hacia el puerto, el tránsito terrestre para dar paso a vehículos de carga, el desarrollo de áreas habitacionales y las dificultades estructurales y de cimentación arrojadas por los previos análisis de la zona.

La ciudad de Tampico está rodeada de lagunas, ríos y litorales. Se encuentra expuesta a sufrir inundaciones periódicas, ocasionadas por el desbordamiento de los ríos Pánuco y Tamesí, lo cual puede dejar a la urbe aislada, subiendo el nivel del agua más de cuatro metros, como sucedió en 1955.

Ante esta situación se planteó la necesidad de dar continuidad a la carretera Costera del Golfo, sin desatender la importancia de no bloquear el desarrollo portuario; la carretera se encontraba interrumpida por el río Pánuco, el cual se cruzaba en pequeñas embarcaciones. Adicionalmente se presentó un incremento en el volumen de tránsito generado por el enorme desarrollo socioeconómico dado en los estados de Hidalgo, Veracruz, San Luis Potosí y Tamaulipas, así como por el aumento del movimiento en el puerto de Tampico, el cual necesitaba una consolidación de redes de comunicación vía terrestre de forma permanente y fluida.

Otro aspecto importante consistió en prever el fuerte impulso que daría a la región la operación del nuevo puerto de Altamira.

De esta manera, el puente, ubicado en la zona conurbada Tampico-Ciudad Madero, consolidó la infraestructura para el transporte terrestre hacia los puertos de Tampico y Altamira, a la vez que mejoró la integración regional de la cuenca del bajo Pánuco con el noreste del país, al asegurar la comunicación permanente por tierra.

El gobierno mexicano, por conducto de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, puso en servicio el puente Tampico el 17 de octubre de 1988.

Estudios preliminares

En primera instancia se llevaron a cabo aquellos estudios que correspondían a la elección del sitio de cruce del puente Tampico, ya que éstos serían determinantes para la definición del proyecto. Se analizaron varias alternativas de ubicación.

Entre ellas se consideró un lugar cercano a la desembocadura del río en el golfo de México. El Chijol tenía la ventaja de que el tránsito externo podía canalizarse sin cruzar por las áreas metropolitanas de Tampico-Ciudad Madero; sin embargo, la desventaja era encontrarse en una zona totalmente plana, expuesta a inundaciones. La longitud del puente resultó de unos 2 200 m y la profundidad requerida para la cimentación llegó a los 70 metros.

Se estudió también un área donde ya existían dos sitios donde se usaban transbordadores, llamados El Humo y El Pitillal, cercanos a la desembocadura de la Laguna del Chairel hacia el río Pánuco. Estas locaciones tenían el inconveniente de estar en la zona céntrica de la ciudad de Tampico, lo que provocó la afectación de un número importante de construcciones, ocasionando también serios problemas viales. Fue en esta zona donde se presentaron las peores inundaciones en el año de 1955.

El Moralillo, próximo a la confluencia de los ríos Tamesí y Pánuco, ofrecía ventajas en cuanto a la profundidad de cimentación de la estructura; pero tenía inconvenientes en los accesos, debido al gran desarrollo dado en terrenos bajos e inundables, lo que requería la construcción de varios puentes auxiliares.

Finalmente, el cruce elegido fue "El 106", entre Mata Redonda, en la margen derecha, y Andonegui, en la margen opuesta en virtud de que las condiciones topográficas propiciaban que el puente tuviera menor longitud y permitían, además, la comunicación continua aun en las peores condiciones de inundación. La geología también ofreció ventajas, en comparación con los otros cruces estudiados, ya que permitía resolver parte de la cimentación mediante zapatas.

Entre los numerosos estudios realizados para la correcta ejecución del proyecto estructural destacan los siguientes:

- Estudios aeroelásticos en túnel de viento.
- Selección de tipos de acero y de anclajes para los tirantes.
- Definición de materiales de protección contra la corrosión.
- Determinación del módulo de elasticidad del concreto.
- Análisis estadísticos de frecuencia de ciclones, así como de su intensidad, con un periodo de retorno de 100 años, tanto para el golfo de México como para la ciudad de Tampico.
- Efectos térmicos ambientales en los tirantes y en la estructura metálica para el control de deformaciones.
- Estudios de vialidad.
- Medidas de prevención para la navegación aérea.
- Proyecto de iluminación para destacar por las noches la arquitectura del puente.
- Estudios de cimentación.
- Estudios geotécnicos y de pavimentos.
- Estudios especiales del efecto del viento sobre la estructura y sobre la configuración de los tirantes.

La historia registra que la región ha sufrido graves daños por ciclones, que han tenido vientos hasta de 250 kilómetros por hora. En cambio, en muy pocas ocasiones se han presentado efectos sísmicos. Debido a tales condiciones, se requería garantizar la estabilidad de la estructura, principalmente contra el viento.

En lo que se refiere al efecto de torsión, se observó que la selección del tablero proporciona un amortiguamiento que limita su deformación a un valor máximo

Arriba: El puente está compuesto de tres partes: un claro principal y dos viaductos de acceso; el del margen izquierdo tuvo una mayor dificultad en su planeación porque era la zona más urbanizada. La subestructura la integran 21 apoyos: dos caballetes extremos y 19 pilas con una altura mínima de 5 m y máxima de 40 m. **Abajo:** Cimbrado de una de las pilas principales (13 y 14), que son el apoyo del tramo de 360 m. Al conjunto de las columnas y el mástil se le llama pilón y su diseño es de Y invertida. Al concluir la pila No. 13 desde el nivel de desplante hasta el mástil, la altura total fue de 185 m. En ese momento se comparaba con la Torre Latinoamericana, pues este elemento superaba por más de la mitad la altura del famoso edificio capitalino.

Después de varios análisis se concluyó que la superestructura debía ser de concreto en la parte del viaducto y metálica para el claro principal. Para lograr continuidad en la línea arquitectónica, ambas secciones transversales debían tener la misma forma exterior. Con el procedimiento de doble voladizo se efectuó la construcción de la superestructura en tramos de 3.50 m y aunque la construcción se hizo en etapas cortas y repetidas, se requirió de una menor mano de obra, pero con mayor especialización. Por otro lado, el control y la supervisión debían ser sistemáticos. Además, se logró un gran avance al implantar dos frentes de trabajo.

de 32 cm en el centro del tramo de 360 m, magnitud que es considerada aceptable.

Por otra parte, para definir tanto el material como la configuración de los tirantes, se realizaron también diversos estudios. En primer término, se hicieron pruebas estáticas y dinámicas para el acero, con torones fabricados en diferentes países, para comparar la resistencia a la fatiga, la baja relajación y la baja susceptibilidad a la corrosión.

Una vez elegido el acero, fueron realizados ensayes de laboratorio para cables representativos de los tirantes, compuestos por 33 torones de 15 milímetros cuadrados de área y una longitud de cinco metros, con cuatro diferentes sistemas de anclaje, que se probaron en máquinas especiales con el fin de evaluar su comportamiento y resistencia, primero a la fatiga para dos millones de ciclos, con rango de variación de 18 kilogramos por milímetro cuadrado hasta un esfuerzo máximo de 45% de su resistencia a la ruptura y, posteriormente, a la ruptura misma.

Adicionalmente, se analizaron las características de la cera, con el fin de proteger al acero, así como las del tubo de polietileno que contiene los torones que forman el tirante y confina la cera.

Estudios de campo

El levantamiento topográfico definió el eje del cruce en el sitio seleccionado, la longitud total de la estructura y la posición en la cual serían colocados los apoyos, para no interferir con la vialidad existente y resolver la intercomunicación y distribución del tránsito.

La dificultad indicaba que la ubicación del puente tendría consecuencias que afectarían a las construcciones existentes en el sitio, por lo cual se plantearon anteproyectos para reactivar el área afectada, proponiendo convertir este espacio en un parque recreativo

que conjuntamente con el puente, conformara un espacio habitable y un paisaje armónico.

De los estudios hidráulicos para conocer los niveles y caudales máximos del río se obtuvo información relacionada con la intensidad máxima de los vientos generados por acciones ciclónicas, así como estadísticas de frecuencia y épocas del año en las cuales se presentaban.

Se realizaron 36 sondeos en el subsuelo con una longitud total de 1 142 m; la mayor profundidad a que se llegó fue del orden de 80 m. Este estudio se hizo en una longitud de 1 500 m para poder cubrir toda la extensión de la estructura propuesta. La ubicación de los sondeos se determinó conforme a la posición de los apoyos, prevista en los anteproyectos.

Durante la exploración de tipo continuo se combinó el procedimiento de penetración estándar con el muestreo inalterado con tubo *Shelby* de pared delgada.

Los resultados de los sondeos mostraron que los depósitos superficiales estaban formados por suelos blandos y poco resistentes; en cambio, en el fondo, la roca alterada mostró formaciones duras y poco compresibles, en las cuales se recomendó apoyar la cimentación.

El tipo de suelo encontrado en el borde izquierdo del río, donde se ubican los apoyos del 1 al 6, fue una arenisca, localizada a profundidades de 1 a 8 m y con espesores de hasta 13 m. Dadas las características friccionantes de este tipo de roca, se recomendó una cimentación superficial. Entre los apoyos 6 y 7 se hallaron superficialmente arcillas blandas, poco firmes. Los suelos resistentes se encuentran a 20 m de profundidad.

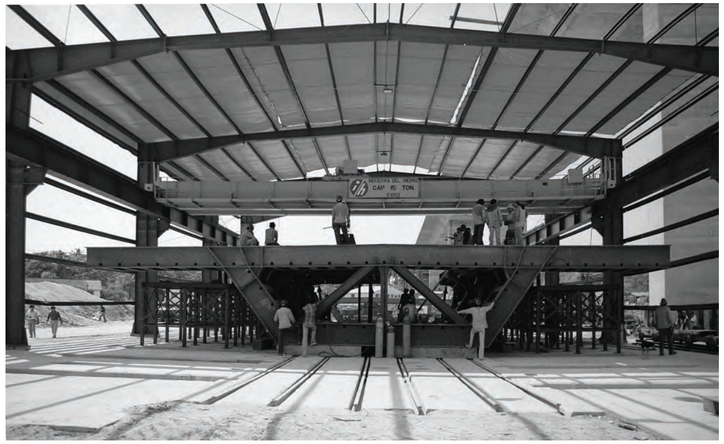
Las arcillas arenosas, las cuales son muy compactas y duras, producto de la alteración de la lutita, están a profundidades comprendidas entre 60 y 74 metros.

En la margen derecha y en la zona de los apoyos 14 y 15 se descubrieron dos estratos de arcilla de alta y baja compresibilidad, respectivamente; su consistencia es blanda y el espesor varía de 10 a 20 metros.

Más abajo se localizó un estrato del orden de 10 metros de espesor, formado por arena arcillosa igualmente muy compacta, con fragmentos de arenisca. La capacidad de carga de este suelo fue determinada en 280 toneladas por metro cuadrado.

Entre los apoyos 16 y 17 los suelos son arcillosos blandos hasta los 11 m de profundidad. En seguida hay un manto de arena arcillosa compacta y resistente, de 2 m de espesor y otro de lutita de 1.50 m. A partir de una profundidad de 6 m se encontró una arenisca alterada, con capacidad de carga de entre 120 y 175 toneladas por metro cuadrado.

Este último manto se localiza también en la zona de los apoyos 18 y 19, pero a poca profundidad, lo que permitió considerar una solución de cimentación superficial mediante zapatas, con capacidad de carga de 60 toneladas por metro cuadrado.



Definición del proyecto

Elección del tipo de estructura

Tomando en cuenta los volúmenes de tránsito carretero y fluvial, se definió que el puente debería permitir el paso simultáneo de vehículos y de embarcaciones.

Por otra parte, para evitar los posibles accidentes por colisión de embarcaciones, se decidió que no era conveniente alojar apoyos de la estructura dentro del cauce, lo cual significó que el claro libre del puente sobre el mismo resultara del orden de los 360 m. Ello permitiría una mayor libertad en la navegación y el desarrollo de nuevas zonas para muelles.

Una vez concluidos los estudios y sondeos del lugar, fueron analizadas tres posibles soluciones estructurales para salvar el claro principal de 360 m, incluyendo estructura colgante, armadura continua de tipo voladizo o estructura atirantada suspendida por cables rectos.

También se estudió de manera minuciosa la posibilidad de construir un túnel; sin embargo, aunque el costo inicial de la solución era económicamente comparable con la del puente, los costos de operación y mantenimiento resultaban más elevados. Finalmente, fue elegida la opción de construir un puente atirantado, por las ventajas estructurales y económicas que representaba.

Arriba: Las instalaciones para el proceso de armado y preparación de dovelas requirieron de un patio de aproximadamente 30 000 m². El espacio se dividió en naves en las que cabían tres dovelas consecutivas; cada una contó con grúa viajera, sistemas de gateo hidráulico y mecánico, así como con estructuras auxiliares para la fijación y nivelación de cada pieza. **Abajo:** Una vez armada la dovela, fue necesario transportarla por el río hasta el lugar donde se izó.

Derecha: La parte central del puente es ortotrópica; es decir, tiene forma recta o lineal. Estas estructuras tuvieron su origen en la década de los cincuenta en Alemania y se aplicaron primero en cascos de embarcaciones y en el fuselaje de aviones. Este diseño se hizo extensivo a los puentes porque se demostró que hay un ahorro aproximado de 50% de acero estructural, que a la vez disminuye el peso y el costo total. **Izquierda:** Construidas en la ciudad de Monterrey, NL, cada una de las dovelas era armada *in situ* y después izada en el lugar que le correspondía, siguiendo un estricto control geométrico. Esta actividad debía ser coordinada por la Capitanía de puerto, pues factores como el clima, el oleaje y el tránsito de navegación podían influir en el transporte e izaje de las piezas.

Para definir las características detalladas del tramo principal se estudiaron diversas soluciones, fundamentalmente en lo referente a la configuración del atirantado.

Se analizó tanto la solución de suspensión lateral o axial, como la distribución y fijación en el pilón o mástil, siguiendo las tres formas típicas: en abanico, en medio abanico, o en arpa. Asimismo, se ponderaron las opciones de pasar los tirantes por el pilón en forma continua o de anclarlos a éste.

Los cables son los elementos más importantes del sistema de atirantado de una estructura, ya que de ellos depende la estabilidad de la obra. No obstante, por sus condiciones de operación están muy expuestos a los efectos de fatiga y corrosión; por ello se puso especial énfasis en la forma y tipo de acero, en las características del sistema de anclaje, la resistencia estática, la fatiga del conjunto, el procedimiento para proteger contra la corrosión y el comportamiento dinámico por efecto de las cargas móviles, principalmente del viento. De la misma manera se consideró la sustitución de los cables.

A partir de dichas consideraciones, se dispuso que para el puente Tampico se utilizara el atirantamiento axial, en forma de medio abanico y que los cables se colocaran con un anclaje fijo en el mástil y otro móvil en el tablero de la superestructura.

El acero que se eligió para los cables fue torón galvanizado de 15 mm de diámetro, con resistencia a la ruptura de 180 kilogramos por milímetro cuadrado. Está protegido contra la corrosión por medio de cera confinada dentro de un tubo de polietileno de alta densidad.

El sistema de anclaje fue elegido tras hacer pruebas y ensayes de laboratorio con cuatro diferentes tipos, mediante la integración de cables representativos con 30 torones y cinco metros de longitud. Al final se seleccionó el que presentó mejores condiciones de calidad y mayor facilidad para integrar el cable antes de su colocación.

Cimentación

La cimentación es de tipo profundo, lograda con cilindros de concreto reforzado de sección circular hueca de 6.40 m de diámetro exterior y 80 cm de espesor, en los apoyos 1 al 12, y del 15 al 17. Fueron hincados en el terreno desde los 10 m hasta 65 m de profundidad.

En los apoyos 13 y 14 del tramo de 360 m se usaron cajones de concreto reforzado con sección transversal de forma elíptica; miden 13.40 m en su eje mayor y 10.50 m en su eje menor. Cada apoyo está dividido en cuatro celdas y el espesor de las paredes es de 1 m. Sus longitudes son de 65 m (apoyo 13) y 30 m (apoyo 14).

Los apoyos extremos, así como las pilas 2 a 6 y 18 a 20, se cimentaron por superficie mediante la utilización de zapatas. Para la pila No. 7 se usaron pilotes colados *in situ*, de 1.50 m de diámetro y con una longitud máxima de 18.50 metros.

Subestructura

La subestructura está compuesta por 21 elementos de apoyo: dos caballetes extremos y 19 pilas, todos de concreto reforzado. Tiene una resistencia de 250 a 300 kilogramos por centímetro cuadrado y su altura varía desde 5 m hasta 45 metros.

Las pilas son huecas, de sección rectangular, de 2.40 x 6.40 m, con espesor de 40 cm en sus paredes, para las correspondientes a los viaductos, y de 50 cm para las del tramo principal. Las que sirven de apoyo al tramo de 360 m son de sección variable. En el arranque son rectangulares y están divididas en tres cuerpos, uno central vertical y dos laterales inclinados, unidos por un elemento horizontal a 48 m de altura, en el que queda contenida la sección de la superestructura.

A partir de este nivel se levantan lateralmente dos columnas inclinadas, huecas, que convergen y se unen a 33 m de altura, para continuar formando en sentido

Una vez concluida la etapa de fijación de la dovela metálica, el siguiente paso fue iniciar el colado de todo el elemento. En cada unos de los pasos llevaron mediciones y nivelaciones que permitieron ver los efectos térmicos, el cumplimiento de las resistencias del acero y del concreto, y las posibles deformaciones.

vertical, la porción denominada "mástil", con una sección transversal constante hexagonal, también hueca, de 2 m por lado y 42 m de altura.

En el interior de las columnas y del mástil se colocó una escalera metálica con alumbrado, que tiene por finalidad facilitar el acceso desde el nivel de calzada del puente hasta la parte superior del mástil.

La altura del pilón es de 119 m por lo que, tomando en cuenta la longitud del elemento de cimentación, la altura total es de 185 m en la pila No. 13, que equivale a más de tres veces la que alcanzan las torres de la catedral de la Ciudad de México, o aproximadamente a una y media veces la altura del edificio de la Torre Latinoamericana, en la misma ciudad.

Superestructura

La superestructura es de concreto presforzado de sección cajón, a excepción de los 293.50 m centrales del tramo de 360 m, donde es metálica de tipo ortotrópico. El ancho total de 18.10 m permite alojar dos calzadas de 7 m de ancho cada una para la circulación de cuatro líneas de tránsito, dos en cada dirección.

Se plantearon varias soluciones para determinar las características de la superestructura y, una vez definida la longitud de 360 m para el claro sobre el río, se estudiaron diversas posibilidades de longitud para los tramos adyacentes, así como el material estructural más conveniente.

Debido a la agresividad del ambiente en la zona donde se ubica la obra se concluyó que la mejor solución era el concreto, ya que evita los efectos de la corrosión; sin embargo, se presentaban dos limitaciones:

a) Cuando el proyecto se hallaba en proceso de realización no existían antecedentes ni experiencias mundiales acerca del diseño o construcción de una estructura atirantada de concreto, con claro mayor de 320 metros.
b) La gran carga que se originaría sobre la cimentación, en particular sobre el apoyo principal del margen izquierdo, donde el suelo resistente se encontraba a 60 m de profundidad, con valor de 230 toneladas por metro cuadrado.

Ante tales restricciones, sólo después de múltiples análisis se logró una óptima solución estructural y mayor simplicidad de construcción. Se obtuvo el resultado más económico al adoptar tramos laterales de 70 m de longitud, con voladizos hacia el claro principal de 33.25 m de concreto presforzado, pasando el tablero sobre las pilas principales.

Ante tales condiciones, la carga sobre la cimentación de las pilas principales se reducía a un valor del orden de 18 000 toneladas.

Se decidió integrar por tramos continuos la totalidad de la superestructura. La parte de los apoyos 1 al 6 quedó provista de dispositivos de soporte que permiten deslizamientos longitudinales, y elementos de concreto para la transmisión de fuerzas transversales. En el resto de los apoyos, la superestructura es continua, con sus pilas para formar marcos.

En la longitud total del puente sólo se previeron tres juntas de dilatación intermedias y una sobre cada apoyo extremo. Dos de las primeras limitan la parte atirantada.

El planteamiento del tipo y la forma de los pilones y pilas principales se hizo paralelamente a la definición del atirantado y de las características del tablero.

Atirantamiento

El atirantamiento del tramo principal es axial, dispuesto en forma de medio abanico. Está integrado por 44 cables de longitud variable, desde los 58 m hasta los 206 m. Los cables están constituidos por torones galvanizados. Su diámetro nominal es de 160 mm y su área efectiva es de 150 milímetros cuadrados.

Cierre del claro principal del puente Tampico, que alcanza una longitud total de 360 m y superó por 72 m al puente atirantado Ingeniero Antonio Dovalí Jaime, construido en la ciudad de Coatzacoalcos e inaugurado en 1984, que hasta entonces era el puente atirantado más importante en México. El acero utilizado en los tirantes del Tampico se importó de Bélgica. En total se usaron 44 tirantes, que se fabricaron sobre el viaducto; el más largo mide 206.19 m, mientras que el menor es de 58.60 metros.

El número de torones varía de 33 hasta 60 por cable; se alojan en tubos de polietileno de alta densidad, de 20 cm de diámetro por 2 cm de espesor. En el interior de cada tubo fue inyectada una cera especial de alto punto de fusión, derivada del petróleo, que contiene inhibidores químicos de la corrosión y proporciona al cable de acero una amplia protección contra el ambiente agresivo de la zona.

Los cables se fijaron al mástil en uno de sus extremos, mediante un sistema de anclaje pasivo y, por el otro extremo al tablero de la superestructura, mediante un anclaje activo que permite poner en tensión cada uno, tanto durante el proceso de la construcción, como durante la operación para verificarlos y ajustarlos, en caso necesario.

Tablero metálico

La sección transversal de la parte metálica del tablero tiene la misma forma exterior que la sección de concreto, logrando así continuidad en la línea arquitectónica.

En la parte interior, tanto para el patín superior que sirve a los vehículos como superficie de rodamiento, como para las almas y el patín inferior, que cierran la sección de cajón, se utilizaron placas de acero ortotrópicas.

Resultó un importante logro resolver el problema de las 7100 piezas que conforman la estructura ortotrópica, empleando únicamente 170 tipos, en promedio se repite 42 veces cada pieza.

Cabe señalar que la estructura ortotrópica adaptada, al igual que la sección de concreto, cuenta con rigideces de torsión y de flexión (vertical y horizontalmente) muy elevadas, que permiten alojar los tirantes en un solo plano, al centro de la sección transversal, sin que se presenten problemas debido a la aplicación asimétrica de las cargas móviles, rodantes o de viento. Asimismo, la acción de los tornapuntas, alojados en un plano vertical en la zona de anclaje de los tirantes, coadyuva a la estabilidad transversal.

Los esfuerzos resultantes, generados por la combinación de cargas locales y de flexión general en el claro de 360 m, alcanzan valores permisibles de entre 60 y 75% de la resistencia última, principalmente a compresión.

Premios

Debido a las características sin precedentes del puente Tampico, éste se hizo acreedor a dos distinciones internacionales: La Fundación Puente de Alcántara de España la calificó como la obra pública más destacada terminada entre 1988-1989 en el mundo ibérico (España, Portugal e Iberoamérica) y el *American Concrete Institute* le otorgó la Presea de Excelencia, entre las obras terminadas entre 1988-1989 en Estados Unidos, Canadá y México. La filosofía, su concepción y la tecnología específicamente desarrollada para este puente, han sido reconocidas como aportaciones trascendentales y se han adoptado en los mayores puentes atirantados, tales como el Normandie, en Francia, con claro de 856 m, y el Tatara, en Japón, con 890 m de longitud.

La estratégica ubicación del puente Tampico en una zona alta ha garantizado hasta el presente que en época de lluvias no existan inundaciones en los accesos, que interrumpan el tránsito vehicular. El espacio libre vertical de 50 m también permite el paso de las embarcaciones aunque suba el nivel de agua del afluente.

Puente Atenquique II
1991

EJE CARRETERO
Manzanillo-Tampico con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo

AUTOPISTA
Guadalajara-Colima

UBICACIÓN
Atenquique-San Marcos
Km 107+500

ESTADO
Jalisco

TIPO DE PUENTE: Empujado

LONGITUD TOTAL: 440 m

No. DE APOYOS: 10

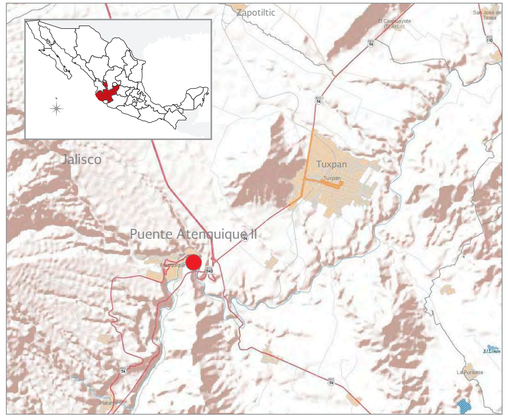
No. DE CLAROS: 9

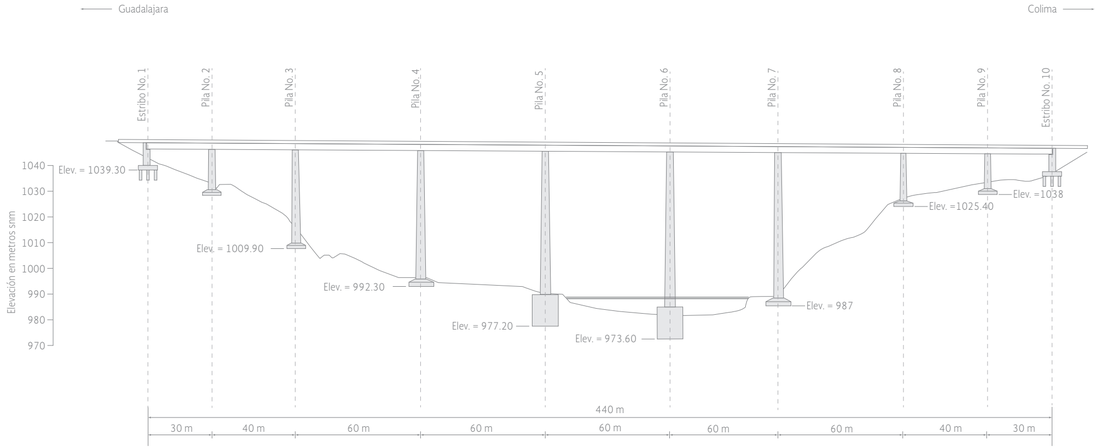
CLARO MÁXIMO: 60 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 98 m

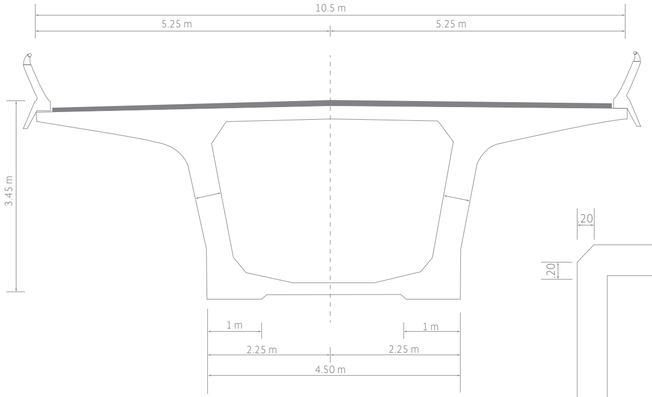
ANCHO TOTAL: 10.5 m

No. DE CARRILES: 2

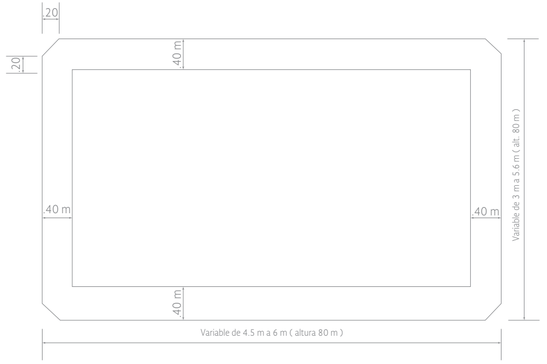




Sección transversal



Sección de pila



La ampliación de la autopista Guadalajara-Colima, como el enlace de mayor cabida entre la zona centro-occidente del país y el centro de Manzanillo, implicó la construcción de un cuerpo paralelo de 10.5 m de ancho para alojar dos carriles más de circulación a lo largo de un tramo de 80 kilómetros de vía entre la ciudad de Sayula y el límite de los estados de Jalisco y Colima. Dicha ampliación comenzó en el año de 1987 y para 1991 ya se encontraba en operación.

Este proyecto de ampliación integró la construcción de un total de 15 puentes, así como de 45 pasos vehiculares a desnivel además de la creación de 5 entronques. A todo este complejo carretrero se le llamó Javier Barros Sierra en honor al distinguido ingeniero mexicano. Para tales fines, fue necesaria la extracción de 10 150 000 m^3 de material obtenido tras los cortes realizados y la compactación de 12 000 000 m^3 más para mejorar las condiciones topográficas del terreno. La construcción de esta magna obra logró generar un total de 4 100 empleos directos y más de 1 900 indirectos durante su periodo constructivo.

Entre los puentes que destacan por sus características de longitud, altura y sistemas constructivos, destacan el Barranca Beltrán, y los puentes Atenquique I y II, cercanos de la población del mismo nombre, separados algunos metros de distancia. Por esta autopista transitan diariamente más de 10 000 vehículos, entre los cuales, se calcula que una cuarta parte se trata de transporte de carga, lo que hace de ésta una de las vías de comunicación terrestre con mayor afluencia relacionada con el trasporte de mercancías y productos agrícolas dentro de la República mexicana.

Antecedentes y objetivos

El puente Atenquique II, se ubica en el estado de Jalisco, sobre el tramo con dirección Atenquique-San Marcos que pertenece a la carretera Guadalajara-Colima, a la altura del km 107+500. Está separado de su puente homónimo por aproximadamente 1000 m de vía, el cual presenta las mismas características constructivas; en su edificación se utilizó el Sistema de Lanzamiento por Incrementos Sucesivos. Los puentes Atenquique se diferencian por la longitud del claro que salvan y el número de apoyos requeridos para ello, el Atenquique I tiene 8 apoyos para una longitud de 320 m; mientras que en el segundo hay un total de 10 apoyos y una longitud de 440 m, éste es el más extenso de los puentes que conforman toda la carretera.

Cimentación

Al momento de realizar los trabajos de cimentación del puente, se presentaron múltiples dificultades debido a que el terreno se compone por materiales heterogéneos que presentan distintas reacciones bajo condiciones de carga por lo que los técnicos recurrieron al uso de gatos hidráulicos de alta potencia que permitieran empujar el concreto bajo requerimientos de gran precisión en el funcionamiento de estos equipos y evitar posibles derrumbes debido a las cualidades geológicas del sitio.

La cimentación en todos sus elementos de apoyo está conformada por zapatas con secciones variables coladas con concreto reforzado. Únicamente la cimentación del estribo en el eje No. 1 se auxilia por medio de pilotes para otorgarle mayor adherencia con el terreno.

Subestructura

La subestructura la conforman dos estribos en los ejes No. 1 y 8 para recibir el empuje del puente con el terreno, y 8 pilas que sostienen la superestructura en toda la longitud del puente.

Las pilas son elementos fabricados con concreto reforzado de geometría rectangular con secciones variables entre 4.5x3 m y 8x5.6 m en el arranque lo que las hace cada vez más angostas conforme van alcanzando su altura máxima, la cual varía desde los 18 m en el eje No. 9 hasta los 79 m en el eje No. 6. Estas piezas se encuentran huecas en su interior para reducir su carga sobre el terreno y mantienen un espesor de pared de alrededor de 40 centímetros.

Las distancias de entreje que separan cada uno de estos elementos son de 60 m de claro entre los ejes 3 al 8, mientras que el entre eje 2-3 y 8-9 es de 40 m, y de tan sólo 30 m para los tramos 1-2 y 9-10.

Superestructura

La construcción de la superestructura se llevó a cabo por medio del procedimiento constructivo también conocido como sistema de empujado, librando una altura máxima de 98 m sobre el perfil más bajo del terreno.

La pieza la componen dovelas de cajón hueco, fabricadas en concreto presforzado de 20 m de longitud cada una y un peralte igual a 3.45 m. Fueron coladas *in situ* con ayuda de estructuras de cimbra móvil. Para conformar la superficie de rodamiento se colocaron 3 cm de carpeta asfáltica sobre la longitud total del puente.

Con esta magna obra se lograron ahorros significativos en los costos de operación vehicular para los usuarios; también se redujo el tiempo y la distancia de recorrido de 177 km en poco menos de 3 horas a un trayecto de 148 km, a realizarse en 1 hora y 23 minutos, lo que significaba 1 hora y media menos del recorrido anterior. Además de contribuir con la modernización del corredor Manzanillo-Tampico, la autopista incrementó la seguridad y el confort del recorrido y lo consolidó como un polo industrial, portuario y turístico de especial importancia económica dentro del país.

En el año en que se llevó a cabo la realización de esta obra, el Atenquique II se distinguió como el puente con mayor altura dentro de la República mexicana, pues cuenta con 83 m libres desde el desplante de la cimentación hasta el lecho que está abajo de la superestructura.

Puente Mezcala
1993

EJE CARRETERO
Acapulco-Veracruz

AUTOPISTA
México-Acapulco

UBICACIÓN
Chilpancingo-Puente de Ixtla
Km 172 + 497

ESTADO
Guerrero

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 893 m

No. DE APOYOS: 7

No. DE CLAROS: 6

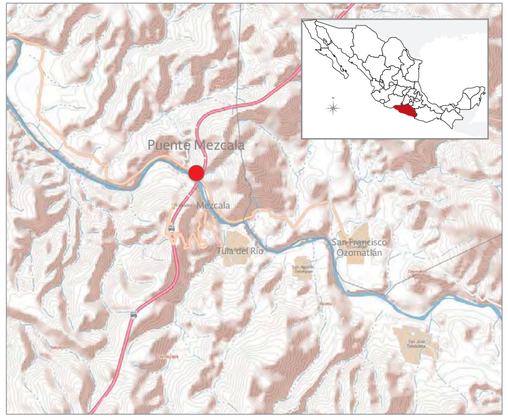
CLARO MÁXIMO: 311 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 141 m

No. DE TIRANTES: 140

ANCHO TOTAL: 19.60 m

No. DE CARRILES: 4



Antecedentes y objetivos

Durante el mes de marzo del año 1989, la SCT lanzó la convocatoria para otorgar la concesión de la construcción del tramo de carretera Tierra Colorada-Acapulco. Posteriormente, la empresa ganadora presentó una propuesta para la ampliación hasta Cuernavaca de dicha concesión, con base en un profundo análisis financiero que demostraba la viabilidad y las ventajas de realizar un proyecto integral, pues de esta manera se fomentaría un mayor tránsito brindando un servicio completo, y se lograrían mantener inalterables los costos por kilómetro de vía asegurando la recuperación de la inversión. Dicha propuesta fue aceptada y como consecuencia se adhirieron dos empresas más al proyecto y se dividieron el tramo total.

La autopista que parte de Cuernavaca hacia Acapulco es una vía rápida y segura que conecta la Ciudad de México con el puerto de Acapulco, lo que incentiva una mayor afluencia turística entre ambos puntos, facilitando de esta manera los fines comerciales entre ambas ciudades, además de contribuir enormemente al desarrollo de la economía del estado de Guerrero, siendo éste uno de los principales corredores turísticos del país.

Es una autopista de altas especificaciones, segura y confortable para los usuarios. Al realizarla logró reducirse de 312 a 262 km el recorrido entre ambas ciudades, además de disminuir el tiempo de recorrido en un total de 2 h con respecto del anterior; todo esto representa un importante ahorro de combustible además de mayor seguridad para el usuario.

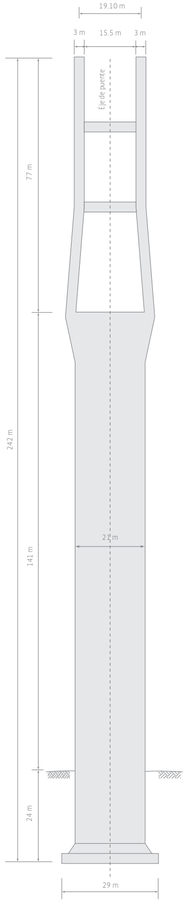
La autopista tiene cuatro estructuras que sirven para salvar importantes hondonadas. Por su longitud y tamaño, la más importante es el puente Mezcala.

Iniciada en el año de 1989 y finalizada en marzo de 1993, la construcción del puente Mezcala se ubicó en el km 172+497 de la carretera federal Cuernavaca-Chilpancingo, en el tramo Morelos/Guerrero-Chilpancingo y es el punto de intersección que libra al río Balsas del municipio Eduardo Neri, en la Sierra Madre del Sur del estado de Guerrero.

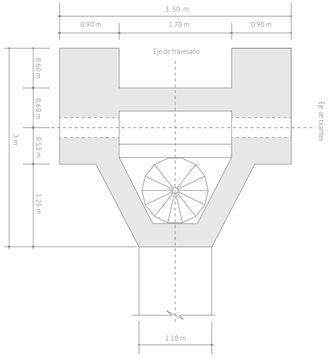
Su diseño obedece a la necesidad de construcción de la presa hidroeléctrica El Caracol, además de que las condiciones orográficas en las que se desarrolló resul-

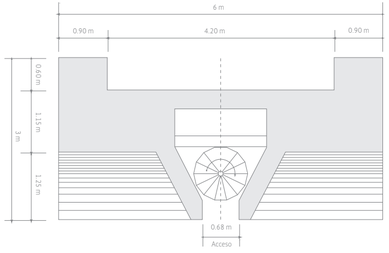
El proyecto nacional de enlazar el país a través de una red carretera con ejes transversales y longitudinales se reforzó en la década de los años noventa. La construcción de la moderna autopista México-Cuernavaca, con su emblemático puente Mezcala, es un claro ejemplo. Además del desafío que representó esta gran estructura para los ingenieros, también abrió nuevas formas de financiamiento mediante la concesión de carreteras, lo cual permitió el desarrollo y multiplicación del kilometraje de caminos de primer nivel a lo largo y ancho del territorio nacional.

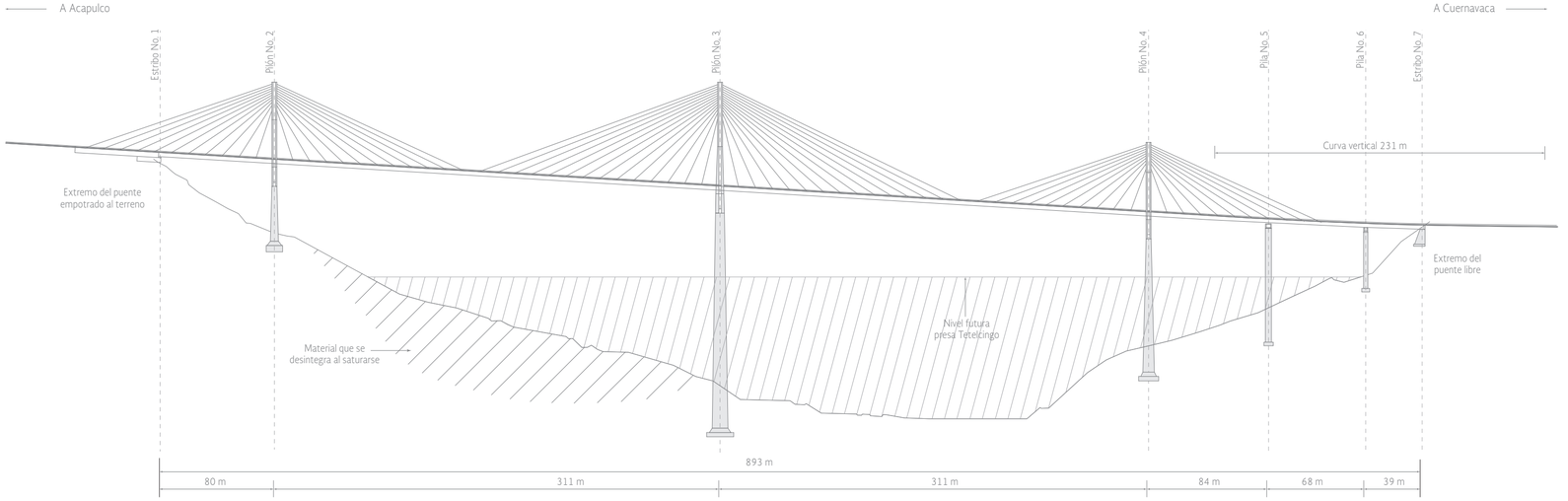
Pila No. 3

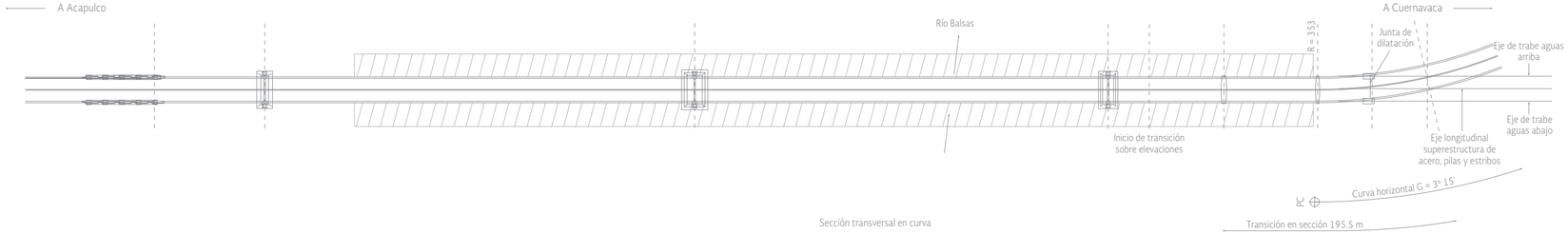


Corte de pilón sobre mástil

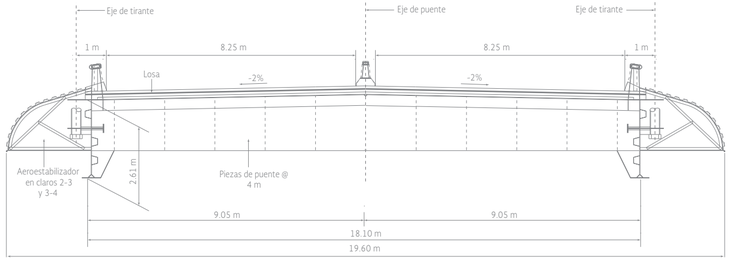




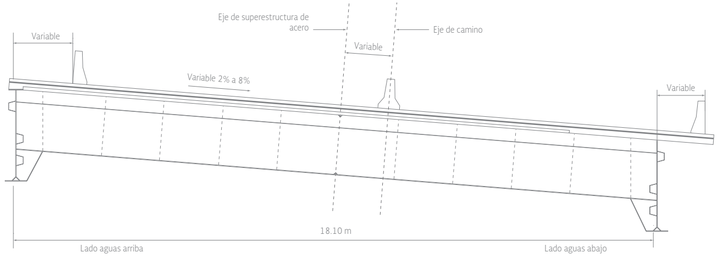




Sección transversal



Sección transversal en curva



Arriba: Caminos de acceso que en total sumaron 48 km, para llegar al sitio de desplante de los apoyos del puente. **Abajo:** Las grandes dimensiones de la cimentación de cada una de las pilas, diseñadas para resistir fuertes movimientos telúricos.

taban excepcionalmente regulares. La concepción de la obra surgió dentro de numerosos factores de conflicto cuya resolución por parte de la autoridad y los constructores exigió el despliegue de una acción sin precedentes en las crónicas de la ingeniería mexicana sobre puentes realizada hasta ese momento.

El verdadero reto consistía en realizar un nuevo puente que remplazara a un puente anterior antiguo, que debido al azolvamiento del cauce del río Balsas, incrementado por la presencia de la presa, ocasionó que el espacio entre el fondo del cauce y la parte inferior correspondiente a la superestructura se redujera de 14.5 m a 5.9 m; incluso llegaron a registrarse niveles de 1.5 m por encima de la parte inferior de la estructura, lo que ponía en condición crítica la estabilidad del antiguo puente y la seguridad de los usuarios, por lo que se gestionaron los recursos financieros para la construcción del nuevo puente, además del desmantelamiento de la estructura anterior para garantizar la seguridad de la estructura misma y de los usuarios que dependen de este servicio de comunicación. La longitud de éste debería ser de 244.48 m con un ancho total de 10.59 m. La solución definitiva logró conciliar los aspectos de funcionalidad con la exigencia que representaban los factores ambientales, tales como dotarlo de resistencia ante sismos y vientos de gran intensidad, así como resistir cargas vivas de hasta 300 toneladas. Por otra parte, resulta de bajo mantenimiento y fue construido en un plazo mínimo, lo que representó un costo competitivo por metro cuadrado de calzada. Adicionalmente, representa un beneficio de carácter socioeconómico al diversificar las actividades productivas de la región y fomentar la creación de empleos temporales durante la construcción del mismo, lo que da por resultado el mejoramiento de las condiciones de vida de la población aledaña.

Estudios preliminares

La naturaleza de la obra contiene características sustentables con el medio ambiente puesto que contempla la unión de dos puntos que generan biodiversidad en el sustrato sobre las bases empleadas para la estructura del puente. La población de Mezcala se encuentra incluida en la zona sísmica tipo D donde se han reportado grandes movimientos telúricos. La ocurrencia de éstos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar 70% de la aceleración de la gravedad.

Paralelamente al proyecto de construcción del puente se planteaba la construcción de una gran presa hidroeléctrica que restringió las posibilidades para la localización del puente a un tramo de río que ocupaba tan sólo 600 m; de no adaptarse a esta limitante, la longitud del puente hubiera resultado varias veces mayor que la adoptada. Dentro de esta restricción, inicialmente se consideró el punto de vista topográfico para delimitar el sitio adecuado; sin embargo, posteriormente se comprobó la imposibilidad de una cimentación eficiente al encontrarse un importante estrato de tobas susceptibles a desintegrarse bajo condiciones de saturación.

Debido a que todos los cruces entre un extremo y otro en esta zona presentaban el mismo problema en el subsuelo, se optó por el que permitiera realizar la cimentación de ambos estribos, y que al menos uno de ellos se encontrara con las condiciones propicias para resistir las fuerzas sísmicas longitudinales.

Para los accesos al sitio de la construcción del puente Mezcala se hizo necesario ampliar un antiguo camino de terracería con una longitud de 48 km, con un ancho de calzada de 6 m y un recorrido promedio de 1.5 horas.

Como parte de las medidas preventivas para evitar las afectaciones tanto del medio ambiente como de la calidad de las aguas superficiales, la SCT destinó sitios fuera de las márgenes del río para depositar el material proveniente de los trabajos de desmonte y limpieza del terreno, así como del trazo y nivelación del mismo que implicó el retiro de árboles, arbustos y piedras, así como en menor grado representó un cambio en los

escurrimientos, por lo que al llover este material sería automáticamente incorporado al cauce del río.

De la misma forma se destinó un área para ubicar el almacén sin que esto afectara física o visualmente el entorno. Fue construido con materiales desmontables y con dimensiones máximas de 4.00 x 8.00 m. Para la limpieza del terreno en el área destinada al desplante de pilas se realizaron trabajos de desmonte a cielo abierto, así como el uso de explosivos tipo *Maxamon* y *Godyne*, previamente barrenados en longitudes de 1.6 m. Para las excavaciones se utilizaron retroexcavadoras y tractores D8N, así como para el alineamiento de los taludes y los posteriores rellenos realizados con el mismo producto de las excavaciones.

Las condicionantes geotécnicas del terreno, donde se encontró un tramo de 250 m conformado por tobas desintegrables, fueron un factor fundamental para optar por la solución de dos claros adyacentes con una longitud definitiva de 311 metros.

Al momento de realizar la excavación para la cimentación de la pila en el eje No. 3, se observó que ésta quedaría 9 m por debajo del nivel del agua, por lo que se construyó un canal de 3 m de profundidad alrededor de la excavación, así como un cárcamo de bombeo de 5 m de profundidad y 2 m de diámetro, en el que se colocó una bomba *Fly* que extrajo 120 litros por segundo durante 16 horas diarias.

Debido a las condiciones del sitio de construcción fue necesaria la instalación de una planta potabilizadora de agua, de donde se suministró el agua para beber y para los servicios del comedor y la clínica. Para poder alojar a los trabajadores de esta obra durante el periodo de dos años que duró el proceso de construcción, se rentó una casa en la población de Mezcala, aproximadamente a 400 m del sitio, buscando respetar a toda costa la cultura y las tradiciones de sus habitantes.

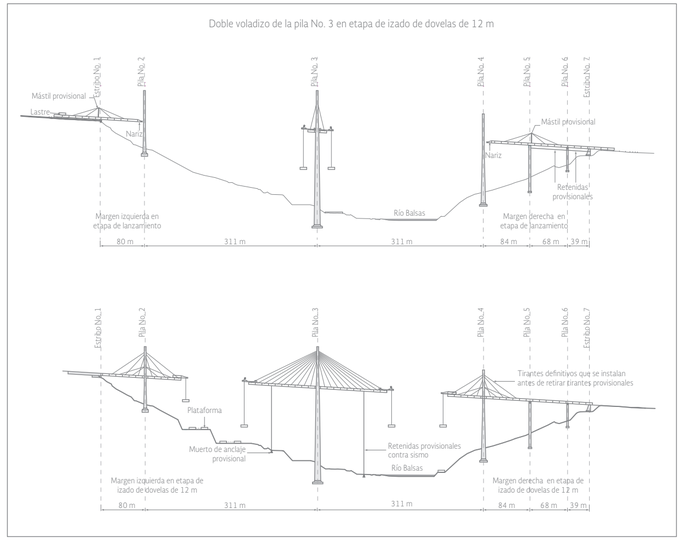
Cimentación

Cada una de las zapatas sobre las que se desplantan las cinco pilas que componen la subestructura está soportada por seis pilotes de 1.20 m de diámetro. Los estribos, por su parte, se encuentran apoyados sobre tres pilotes, cada uno del mismo diámetro.

Todas estas zapatas se encuentran desplantadas sobre un estrato firme de tierra con capacidad de 115 kg/cm² y poseen dimensiones máximas de 19 x 29 m con alturas variables que oscilan entre 3.00 y 6.00 m siendo capaces de resistir fuerzas sísmicas de hasta 200 t/m².

Subestructura

La subestructura del puente Mezcala está conformada por dos estribos y cinco pilas fabricadas con concreto armado, de las cuales las tres primeras son principales



pues soportan los dos claros centrales del tablero y son las que determinan el sistema de atirantamiento. Su sección es variable pues miden 11 x 21 m en el arranque y decrecen hasta el nivel inferior de calzada con una dimensión de 6 x 21 m; en este punto comienzan a ampliarse lateralmente hasta tener 27 m de ancho en la rasante incluyendo los pilones, siendo éstos de tipo H, con una altura cada uno de 76.5 m en los cuales se anclan los tirantes correspondientes.

Pilas principales

Las pilas principales están elaboradas con concreto reforzado, con dimensiones máximas de 11 x 21 m y espesores de pared desde 35 hasta 70 cm. El proceso de colado se realizó mediante tramos de 3 m de altura, utilizando el sistema de cimbras autotrepantes y grúas trepadoras para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones, debido a que se tenían que realizar maniobras a más de 40 m de altura además de que ofrecen mejor acabado que las cimbras tradicionales.

La pila sobre el eje 2 cuenta con una dimensión hueca de 21.0 x0.6 m en el arranque, y 26.76 x 3.50 m en el punto de transición a la superestructura y con una altura total de 117.14 m de los cuales 57.85 m co-

Arriba: Proceso constructivo de la superestructura del puente Mezcala. **Abajo:** Avance de las pilas principales y patio de almacenamiento.

Para construir las pilas principales y secundarias se utilizaron grúas trepadoras y cimbras autotrepantes, que permitieron un avance en tramos de 3 m de altura. La superestructura de 400 m de largo correspondiente a los extremos, se ensambló en los márgenes del río y se empujó, incluso en el margen derecho que tiene una geometría compleja con una curva vertical y horizontal.

rresponden al mástil o pilón. La resistencia del concreto es de 350 kg/cm². La sección hueca se encuentra dividida a la mitad por un diafragma de 25 cm de espesor. La transición es presforzada con ocho cables de 12 torones cada uno con un diámetro individual de 15 mm. A una altura aproximada de 35 m por encima de la rasante del tablero el pilón posee un travesaño con dimensiones de 3.0 x 1.1 m y 15.50 m de largo. También en este nivel se emplaza el último tramo del pilón donde se alojan los anclajes para los tirantes sobre el tramo final de 27.85 metros.

La importancia de la pila No. 3 radica en haber sido, al día de su terminación, la más alta, con una altura total de 242 m, fabricada en concreto reforzado con una resistencia de 350 kg/cm²; con un cuerpo en forma piramidal hueca y un espesor de pared de 35 a 45 cm. En el punto de transición donde recibe a la superestructura la sección varía de 21.00 a 26.76 m en un tramo de 13.5 m de altura. Sobre la transición se construyó una losa de 60 cm que consiste en una sección presforzada por 10 cables de 12 torones de 15 mm de diámetro cada uno.

El mástil o pilón comienza aproximadamente a los 164 m de altura con respecto del arranque de la sección de la pila para desarrollarse a lo largo de otros 78 m, permaneciendo constante en su dimensión en sentido transversal más no en el sentido longitudinal donde varía de 6.0 a 3.5 m. Cuenta además con dos travesaños similares a los del pilón en el eje 2 fabricados en concreto reforzado de 350 kg/cm² de resistencia; en la última parte de éste se alojan 14 anclajes para recibir a los tirantes.

La pila sobre el eje 4 se encuentra más próxima a la margen derecha del río; se trata del apoyo que soporta la última parte del atirantamiento de la superestructura, alcanzando una altura total de 166.53 m, de los cuales 48.53 m corresponden al desarrollo del mástil. Al igual que las anteriores, esta estructura también posee una sección piramidal hueca con una dimensión de 21 x 8 m en el arranque, que se reduce a 21 x 3.5 m en el nivel donde comienza la transición, punto en el que se aumenta hasta 26.6 x 3.5 m; se desplanta sobre una losa de 60 cm de espesor, con una sección presforzada por cuatro cables con 12 torones de 15 mm de diámetro.

El pilón sobre esta estructura es similar a los dos anteriores en características y dimensiones generales. Posee un travesaño aproximadamente en el punto medio del desarrollo del mástil como refuerzo, y a partir de éste se encuentran los anclajes para recibir a los tirantes.

Cada uno de los mástiles de estas pilas posee una escalera interna para realizar el respectivo mantenimiento. Las secciones transversales de los pilones permanecen constantes en toda su altura. El colado de cada uno de estos mástiles se realizó con ayuda de una cimbra autotrepante adecuada a la geometría de éstos con dimensiones de 2.5 x 3.0 m y grúas tipo torre, apoyadas sobre el primer módulo de la superestructura.

Pilas secundarias

Hacia la margen derecha del río se construyeron dos pilas secundarias cuyas alturas no exceden los 85 m y mantienen una sección constante de 4 x 6 m. La función de éstas se limita a soportar las cargas verticales provenientes de la superestructura.

En el caso de estos elementos, y debido a su altura reducida, se utilizó cimbra tradicional colando por tramos de 3 m de altura con ayuda de una torre anclada al cuerpo de la pila, mediante el empleo de bachas y vibradores eléctricos.

Las pilas principales 2, 3 y 4 son del tipo piramidal huecas con espesores de 35 a 45 cm, mientras que las pilas secundarias 5 y 6 son de tipo rectangular huecas con 35 cm de espesor. Ambos tipos de pila fueron construidas con concreto con resistencia de 350 kg/cm². Fueron coladas en tramos de 3 m de altura con el auxilio de grúas torre y cimbra convencional adaptada a las dimensiones de la pila.

La pila en el eje 6 es la más baja de todas con una altura de 45.26 m y es la primera en encontrarse exenta del sistema de atirantamiento.

Estribos

En la margen izquierda del río está marcado el primer eje de la construcción del puente, donde se construyó un estribo formado por una losa de cimentación de 30 cm de espesor, con una longitud total de 57 m y un ancho de 18.10 m, fabricada con concreto de 250 kg/cm². Este estribo forma parte del extremo atirantado del puente por lo que sus características mecánicas son las de un empotramiento; de ahí que se hayan construido dos vigas principales de 1.5 m de espesor por 3.7 m de altura cada una con cables de presfuerzo con torones de 15 milímetros.

Por el contrario, en el otro extremo del río se construyó el estribo No. 7, cimentado con base en dos contrafuertes independientes, tanto aguas abajo como aguas arriba, con dimensiones de alrededor de 4.0 x 9.79 x 1.50 m, diseñados para resistir únicamente las cargas verticales y los empujes de tierra. La separación entre éstos es de 18.10 m, sobre los cuales se encuentra una trabe que recibe a la losa donde se apoya la última dovela del puente.

Superestructura

El puente Mezcala cuenta con una longitud total de 893 m; el ancho total de la superestructura es de 19.6 m, para alojar cuatro carriles divididos por un camellón central de 1.10 m de ancho, además de dos andadores peatonales con un ancho de 1.25 m cada uno, separados del carril vehicular por medio de una guarnición. Son en total seis tramos los que conforman esta superestructura; dos de ellos se fabricaron por medio de dos trabes laterales longitudinales con sección "I", mientras que los cuatro restantes utilizan el sistema de atirantamiento tipo medio abanico apoyándose en tres mástiles de concreto.

Para la construcción de este tipo de superestructura se utilizaron tres diferentes procedimientos con tres distintos frentes de trabajo; en los extremos se implementó el sistema de lanzado y empujado, y a la altura de la pila No. 3 se utilizó el sistema de izaje, mediante gatos y cables para las dovelas.

Los torones, junto a los anclajes individuales en las cabezas de los pilones en disposición cruzada, formaron un diseño único caracterizado por su simplicidad y bajo costo.

Tirantes

La parte más atractiva de la superestructura recae en el sistema de atirantamiento conformado por tres arpas que en total poseen 140 tirantes con una longitud máxima de 185 m cada uno, integrados por torones galvanizados que varían en cantidad de 19 a 31 por tirante con 15 mm de diámetro individual, y se encuentran cubiertos con grasa inhibidora de corrosión y recubiertos con fundas individuales de polietileno de alta densidad de 20 mm de espesor, resistentes a los rayos ultravioleta. Se tensaron inicialmente con gatos monotorón y posteriormente con gatos de 500 toneladas de capacidad.

El sistema de anclaje consistió en sujetar cada uno de los cables individualmente haciendo uso de aparatos sencillos y ligeros, lo que permite garantizar una tensión idéntica en todos los cables. Los tirantes se encuentran protegidos por barreras contra la corrosión debido a la agresividad que representa el clima de la zona.

Para la inyección del torón se utiliza un producto flexible llamado Cera *Inyectelf* aplicada bajo un estricto control. La cera se deposita dentro de los espacios capilares de los cables que constituyen el tirante y la vaina de protección exterior, de manera que la circulación del agua a través del torón resulta imposible. Es importante limpiar previamente los ductos con agua a presión para eliminar el aceite soluble que se emplea durante su montaje; posteriormente el exceso de agua es retirado con aire comprimido.

Los tirantes se encuentran alojados sobre tres pilones de concreto aporticados en forma de H, de los cuales el más alto es de 73 m. Sobre éstos son colocados los anclajes pasivos donde se instala una placa que

Izquierda: Detalle del tirante definitivo anclado a la pieza puente. **Derecha:** La longitud restante del puente se ensambló debajo de éste, conforme al proceso de doble voladizo; cada pieza fue elevada con gatos tragatorón, unidas *in situ* con soldadura, soportadas por los tirantes definitivos. El ciclo completo de montaje de las dovelas llegó a ser de cinco días, en los que se lograron avances globales de 180 m² de calzada por día, en cuatro frentes de montaje y colado.

La superestructura está sostenida por 140 tirantes; los más largos tienen una longitud de 185 m. Cada uno está constituido por torones galvanizados de 15 mm de diámetro, cubiertos con grasa inhibidora de la corrosión y contenidos en fundas individuales de polietileno. El número de torones por tirantes varía de 19 a 31, según la capacidad de ruptura de entre 540 y 800 toneladas. Los torones de cada tirante están contenidos en tubos de polietileno de alta densidad, de 20 mm de espesor, resistentes a los rayos ultravioleta. Fueron colocados uno por uno y tensados inicialmente con gatos monotorón; los tensados posteriores se hicieron con gatos de 500 toneladas de capacidad.

permite apoyar un gato unifilar para jalar el hilo guía. Los anclajes definitivos se encuentran colocados sobre el tablero con los respectivos accesorios para el tensado en la sección circular de la dovela donde se alojará el tirante.

Pilones

El avance en la construcción de éstos resultó significativo debido a que se logró un rendimiento de hasta dos tramos por semana; es decir, de casi un metro por día, lo que representó una optimación de tiempo en este ámbito constructivo.

Alrededor de 45% de la superestructura; es decir, un total de 400 m, fue ensamblado a las orillas del río y posteriormente colocado para realizar el empuje mediante gatos hidráulicos. En los apoyos temporales se colocaron dispositivos de neopreno cubiertos con acero inoxidable en su parte superior, especialmente diseñados para admitir giros apreciables en ambos sentidos, lo que hizo posible el fácil desplazamiento tanto en los tramos rectos como en los que contaban con una geometría compleja, todo sin necesidad de realizar algún ajuste en las elevaciones predispuestas. Para salvar los claros de hasta 84 m mediante el procedimiento de voladizos fue necesario ayudar a la estructura por medio de un atirantamiento provisional con una nariz ligera de 18 m de longitud que posteriormente fue utilizada como viga de izaje para las operaciones subsecuentes.

Los 482 m del tramo restante de la superestructura están conformados por 74 dovelas fabricadas en los talleres Industria del Hierro ubicados en el estado de Querétaro, con acero estructural A-709 grado 50 con dimensiones tipo de 18 m de ancho por 12 m de longitud; con un peso aproximado de 40 toneladas cada una de ellas, las cuales fueron elevadas y colocadas mediante el sistema de izaje, de tal manera que más de la mitad de este mecanismo descansa sobre el tablero mientras que el resto permanece en voladizo. Este tipo de estructuras, una vez sujetas sobre el elemento, son capaces de resistir su peso propio y el de la dovela que se está por izar. La maquinaria utilizada consiste en gatos tragatorón soldados *in situ*. Finalmente, éstas se encuentran soportadas por los tirantes definitivos. Están constituidas por dos vigas principales de 12 m por 2.6 m de peralte y tres vigas puente de 18.10 m de largo por 1.83 m de peralte. En la parte trasera de este sistema se localiza un bloque de concreto que funciona como contrapeso, colocado a 1.15 m del apoyo por detrás de las vigas principales.

En el punto donde esta superestructura se ancló a las pilas se colocaron dovelas *sobre pila*, que son las únicas con 10 m de longitud en vez de los 12 m del resto de las dovelas tipo. Éstas se ensamblaron y soldaron sobre la pila, por lo que fue necesario subirlas en partes por medio de malacates que a su vez fueron armados sobre las pilas. Una vez armadas, fue oportuno colocar sobre ellas uno de los dos sistemas de izaje sobre el que se elevaron las dovelas contiguas.

Debido a su gran altura sobre el nivel del río, el tema de la conservación fue muy delicado pues presentó grandes dificultades para su mantenimiento, por lo que fue necesario aplicar una protección anticorrosiva, para lo cual se requirió primero de una exhaustiva limpieza mediante chorro de arena denominado *Sand Blast*, para este fin se empleó arena sílica que pasa a través de una malla de ¾" y que se encuentra totalmente libre de humedad, por lo que se requiere también de un riguroso proceso de secado.

Esta protección anticorrosiva se consigue mediante un recubrimiento que consiste en un primario de acción galvánica con un espesor de una milésima de pulgada que se aplica sobre las superficies debidamente preparadas, que sea capaz de penetrar profundamente en las porosidades, y posteriormente por una serie de capas de acabados más gruesas de 30 milésimas de espesor en las caras exteriores y 20 milésimas en las caras interiores, que resultan impenetrables para el medio ambiente con capacidad para soportar la abrasión y la erosión pero suficientemente elásticas para absorber los impactos y las dilataciones del acero. En general, se estima que cada milésima de este recubrimiento ofrece una protección durante alrededor de un año, por lo cual puede esperarse que la protección utilizada para el puente Mezcala dure un promedio de 37 años.

Tablero

El sistema de losa fue hecho con base en perfiles Monten que recaen sobre las vigas puente. Sobre éstas se colaron tramos de losa de concreto de 12.0 x 18.5 m que representaron una gran ventaja por haber evitado el cimbrado. Estas maniobras se realizaron mediante moldes perdidos hechos con perfiles de lámina galvanizada de 1.5 mm de espesor doblados en frío. Así logró reducirse el costo y acelerar el procedimiento de colado.

En los tramos donde la estructura no es atirantada fue necesario un peralte para las vigas que fuese mayor que el recomendado en los tramos atirantados, pues estos puntos son propensos a inestabilidad frente a los intensos vientos que soplan en esta zona.

Apoyos / Sistemas especiales

Parapetos

Los parapetos de acero de diseño aerodinámico soportan esfuerzos de trabajo y cargas horizontales locales provocadas por golpes de vehículos de hasta 20 toneladas. Protegen los tirantes contra colisiones.

Junto a las pilas principales, en donde no se requiere el perfil aerodinámico, los parapetos se construyeron de concreto con perfil tipo *New Jersey* y con presfuerzo en la parte superior, para aumentar la capacidad del tablero durante momentos negativos provocados por las cargas vivas.

Junta de expansión

Para cubrir 700 mm de holgura se colocó una junta de expansión para hacer frente a fenómenos no concurrentes como pueden ser las variaciones drásticas de la temperatura ambiental, el acortamiento elástico de la estructura producido por los esfuerzos y las tensiones de los tirantes inducidas por las cargas vivas y permanentes, las deformaciones en la estructura metálica producidas por la contracción y la fluencia del concreto, entre otros.

En marzo de 1993 se concluyó el puente Mezcala, que hizo gala de una combinación insólita de dos grandes claros adyacentes de 300 y 312 m y una altura máxima de pilas de 242 m, además del tiempo récord de realización del diseño y la construcción en un plazo de dos años, en un momento en que no era común el uso de computadoras ni programas de diseño, cálculo o dibujo. Debido a estos factores se reconoció ampliamente el esfuerzo a las autoridades, consultores y constructores que formaron el equipo de trabajo del puente más destacado de la autopista México-Acapulco, que entró en operación en 1994.

Puente Quetzalapa
1993

EJE TRONCAL
Acapulco-Veracruz

AUTOPISTA
México-Acapulco

UBICACIÓN
Chilpancingo-Puente de Ixtla
Km 166+000

ESTADO
Guerrero

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 391 m

No. DE APOYOS: 4

No. DE CLAROS: 3

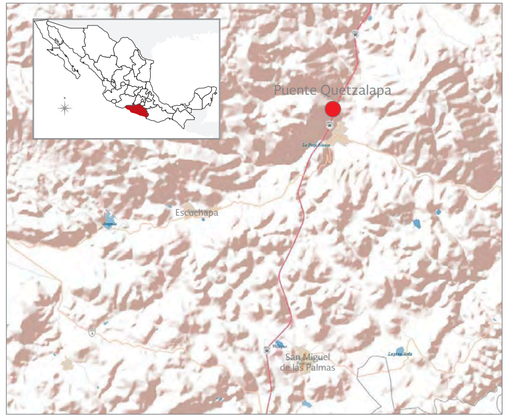
CLARO MÁXIMO: 213 m

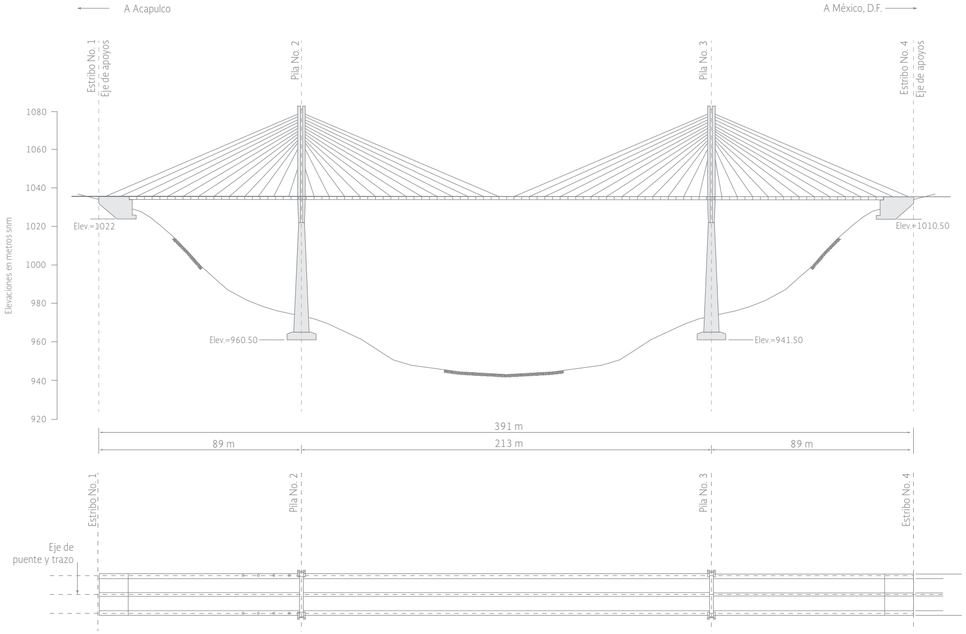
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 53.48 m

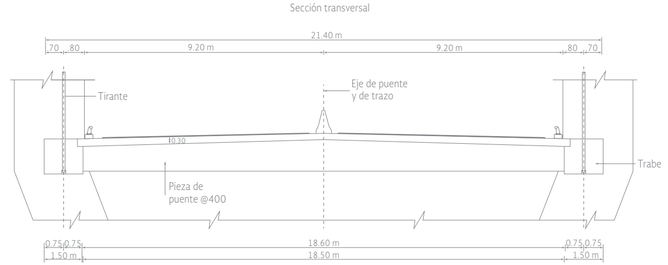
No. DE TIRANTES: 104

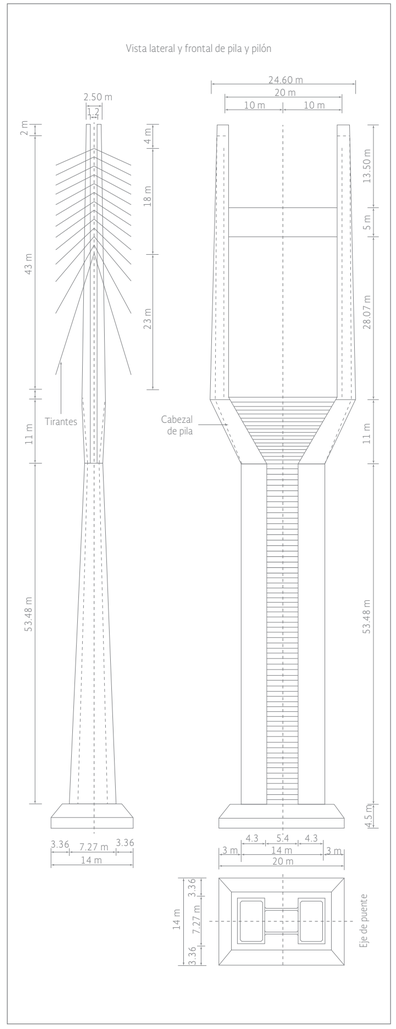
ANCHO TOTAL: 21.40 m

No. DE CARRILES: 4









A una distancia de 20 km del poblado de Quetzalapa, perteneciente al municipio de Huitzuco en el estado de Guerrero, en el km 166 sobre la autopista Cuernavaca-Acapulco se erigió el cuarto puente atirantado más largo del país al momento de haber concluido su construcción en el año de 1993.

Estudios preliminares

Se llevó a cabo un minucioso estudio topográfico combinando el procedimiento de penetración estándar con muestreo inalterado por medio de tubo *Shelby* para definir el sitio donde se colocaría el eje del cruce y así, determinar la longitud de la estructura y la posición donde se desplantarían los apoyos. Se realizaron sondeos en un perímetro de 200 m por una longitud acumulada de 600 m alcanzando una profundidad máxima de hasta 50 m. Para los trabajos de excavación fue necesario el uso de explosivos, además de maquinaria usual pero con adaptaciones especiales.

Cimentación

El tipo de roca encontrada donde se ubicarían los apoyos provocó crear una cimentación superficial que tuviera una capacidad de carga de 55 t/m². Las pilas están desplantadas sobre zapatas aisladas con dimensiones de 20 x 14 x 4.40 m, fabricadas en concreto reforzado con una resistencia f'c= 250 kg/cm².

Subestructura

La subestructura salva un claro de casi 500 m de ancho derivando en una longitud de puente de 424 m; se conforma por cuatro apoyos de alturas desde el nivel de desplante, comprendidas entre 113 y 127 m desde el nivel de desplante, siendo el claro central el mayor con un total de 213 m, mientras que en los extremos éste resulta del orden de 89 metros.

Tanto el apoyo 1 como el apoyo en el eje 4 se componen de dos cuerpos conocidos como cuerpo principal y por otro denominado como estructura auxiliar. El cuerpo principal es un cajón hueco de concreto armado en forma de L invertida relleno con arena compactada a 90%; mientras que la estructura auxiliar descansa sobre la principal ofrece un apoyo multidireccional. Todo esto fue elaborado con concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm².

Pilas

Ambos cuerpos poseen una forma tipo H internamente hueca con una sección de arranque alrededor de los 14.00 x 7.00 m y que va decreciendo hasta el nivel inferior de la superestructura en donde posee una sección de 14.00 x 3.00 m. En este punto se transforman en el cabezal que recibe al tablero para lo cual se ampliaron lateralmente hasta completar un ancho de rasante igual a 24.60 m. Este cabezal se prolonga hasta alcanzar una altura de 11 m. Posteriormente se convierten en los pilones que soportan el sistema de atirantamiento. Estos elementos están fabricados en concreto armado con una resistencia de 250 kg/cm².

La diferencia entre estos elementos radica en la altura total de los mismos pues en la pila No. 2 ésta se eleva hasta los 113.5 m, mientras que en la pila No. 3 se alcanza una altura de 127.39 m. Ambas alojan en el mástil un total de 52 tirantes, divididos en dos medias arpas con 26 tirantes cada una distribuidos en 13 a cada lado. Cada tirante se forma con base en torones marca *Beckaert* variando desde los 12 hasta los 37 torones con 15 mm de diámetro espesor y una longitud comprendida entre 25.36 y 114.43 metros.

Superestructura

El sistema de la superestructura es similar a un mecano de 853 piezas prefabricadas llamadas dovelas, colocadas en tramos de 4 m mediante el sistema de lanzamiento en doble voladizo sobre cada una de las pilas. Se utilizó para ello un equipo de montaje que fuera deslizante.

Dichas dovelas están fabricadas con concreto presforzado suspendidas por medio de tirantes estructurados con torones de 5/8" de diámetro. Sobre éstas se apoyan las llamadas piezas puente. Por encima de ellas se colocaron losas precoladas de concreto reforzado. El ancho total de la carpeta asfáltica es de 15 m con un camellón central de 1.6 m de ancho y dos acotamientos laterales que suman un ancho de 4 m, logrando dos carriles de circulación en cada sentido.

En las dovelas se colocó previamente el anclaje activo desde el cual se llevó a cabo el tensado de los tirantes. Éstos se encuentran protegidos con tubos de polietileno de alta densidad de 25 cm de diámetro y un espesor de 2 cm, inyectados interiormente con una cera especial anticorrosiva.

Cabezal

Estos elementos están fabricados en concreto presforzado con resistencia de 250 kg/cm². El presfuerzo lo forman cables de 12 torones de 13 mm de diámetro, cada uno tensado a una fuerza de 180 toneladas. Llevan un anclaje activo y uno pasivo; por tanto, el tensado se realiza de forma alternada.

Dovela sobre pila

Se construye al término del cabezal para ofrecer una superficie de apoyo para la colocación posterior de los elementos prefabricados. También forma parte del nacimiento de la superestructura pretendiendo ser un elemento rigidizante de la pila. Están fabricadas con concreto fc= 400 kg/cm².

Pilones

Los elementos que nacen del cabezal se llaman pilones y existen dos en cada pila; en ellos se anclan los tubos funda pasivos que alojan a los cables de presfuerzo que soportan el tablero del puente o la superestructura.

La geometría de la sección es hueca con losas interiores hechas con concreto armado, y además presforzados con barras DYWIDAG. La arriostra con el elemento que une a los pilones en la parte alta de la pila con el objeto de rigidizarla, es un elemento macizo hecho de concreto f'c= 350 kg/cm² colocado a una distancia de 18.4 metros.

Sistemas especiales

Antes de poner el puente en servicio, se verificó su comportamiento estructural colocando vehículos pesados puestos en diversas posiciones sobre el claro central de 213.2 m para poder producir deformaciones máximas en el tablero al someterlos a mayores esfuerzos, en los pilones y en los tirantes, e inducirles los mayores valores de esfuerzos.

Asimismo, se generaron vibraciones libres mediante la aplicación súbita de una fuerza de 10 toneladas en el claro lateral de 94.5 metros.

Este puente, localizado cerca de la colindancia con el estado de Morelos, lleva el nombre de la población que se encuentra a escasos 20 km. Se trata del primer puente especial que cruzan quienes circulan por la carretera México-Acapulco en dirección al puerto. El proceso constructivo estuvo basado en el hecho de combinar el doble voladizo con el atirantamiento de la superestructura por medio de cables fijos anclados a los pilones. Sin duda, un sistema que resultaba poco usual para ese entonces dentro del ámbito de la construcción de puentes en México. Por esta razón, la SCT clasificó a esta obra como uno de los cinco puentes especiales de la moderna autopista.

Puente Barranca El Zapote
1993

EJE TRONCAL
Acapulco-Veracruz

AUTOPISTA
México-Acapulco

UBICACIÓN
Chilpancingo-Puente de Ixtla
Km 114+425

ESTADO
Guerrero

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 267.78 m

No. DE APOYOS: 5

No. DE CLAROS: 4

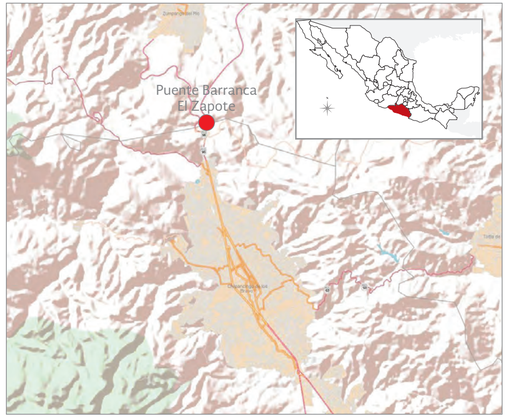
CLARO MÁXIMO: 175.43 m

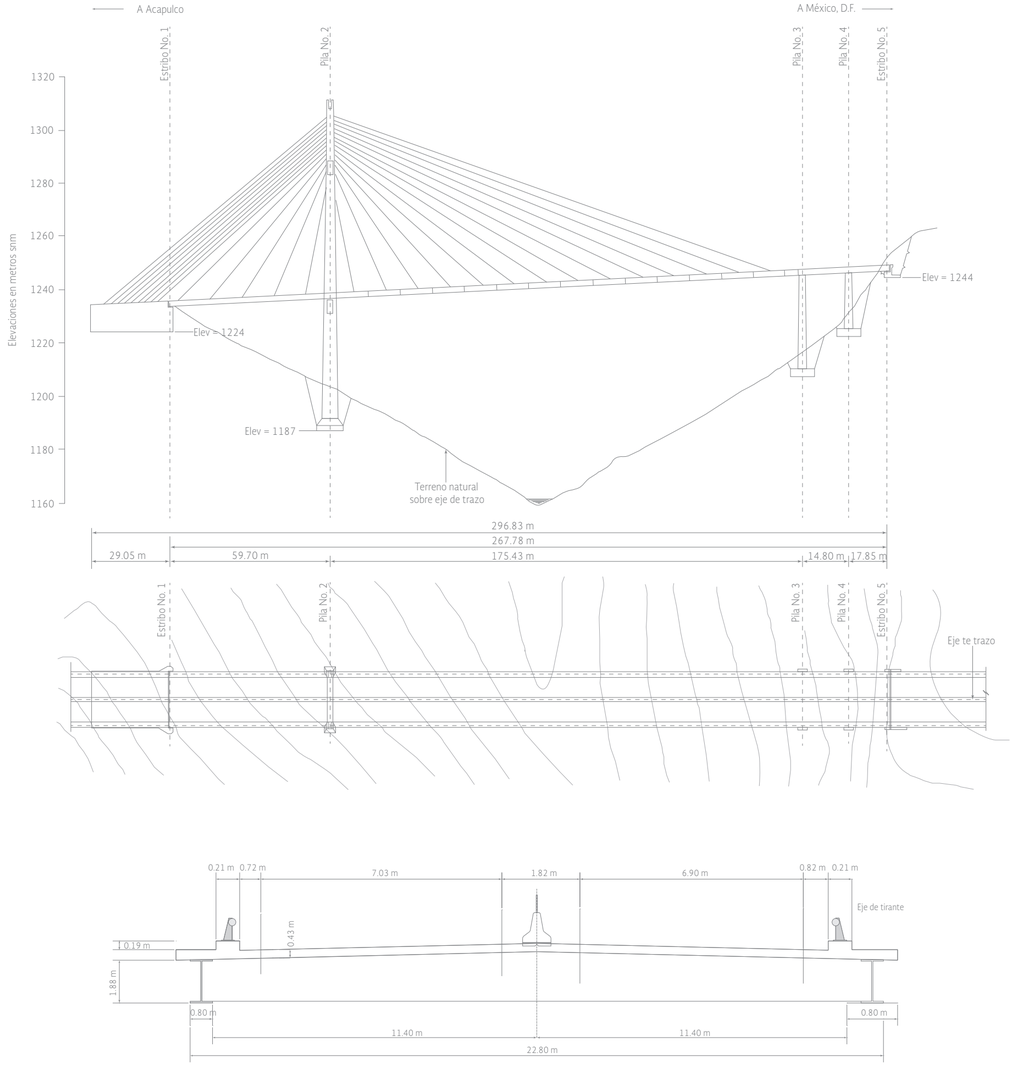
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 48.88 m

No. DE TIRANTES: 56

ANCHO TOTAL: 22.80 m

No. DE CARRILES: 4





Las dovelas del tercer puente atirantado de la Autopista del Sol fueron fabricadas en los talleres Industria de Hierro, en Querétaro, donde se contaba con la tecnología adecuada que garantizaba una excelente calidad y un funcionamiento correcto de la estructura. Una vez que las piezas pasaron satisfactoriamente por el proceso de control de calidad, fueron transportadas hasta la obra por medio de plataformas remolcadas por tractocamiones. En cuanto a la instalación y tensado de los tirantes, se hizo simétricamente respecto del eje de la pila para evitar posibles esfuerzos que pudieran provocar una deformación en la estructura o en el mástil.

El puente Barranca el Zapote se localiza en la Autopista Cuernavaca-Acapulco en el tramo Chilpancingo-Puente de Ixtla, km 114+425. Su construcción inició en 1991 y fue puesto en operación en 1993.

Estudios preliminares

Se tomaron en cuenta las necesidades de los habitantes de los poblados cercanos a la carretera, que tienen que cruzarla diariamente. En la planeación de la autopista se consideró que una vía debe ser un elemento de desarrollo para todas las comunidades que une; pero sin limitar sus actividades. Así, el proyecto contempló cruceros, pasos de ganado y fauna silvestre, además de la conservación de cauces y corrientes naturales de agua mediante la construcción de obras de drenaje.

El proyecto obligó a desarrollar el trazo sobre una de las zonas montañosas más accidentadas del país, y a superar desniveles topográficos de casi 1500 metros.

Procedimiento general de construcción

Para poder tener acceso al sitio de construcción del puente, fue necesario mejorar y ampliar un camino de terracerías que comunica algunos pequeños poblados con la carretera federal. Mediante el uso de tractores se hicieron caminos de acceso a los lugares donde se desplantaron los dos estribos y las dos pilas, de tal manera que se establecieron cuatro frentes de trabajo.

El tipo de roca encontrado en la zona fue una toba riolítica masiva poco fracturada; debido a esto fue necesario el uso de explosivos para realizar las excavaciones en cada uno de los apoyos del puente.

En el sitio de construcción fue instalada una planta donde se produjeron todos los concretos requeridos para la obra, así como un laboratorio donde se realizaron las pruebas necesarias para llevar un control de calidad de éstos. La grava y la arena fueron suministradas por una planta trituradora ubicada a 15 km del lugar en dirección a Cuernavaca.

Cimentación

En la pila 2, la cimentación consiste en una zapata de 5 m de altura, que en los primeros 3 m tiene una sección transversal de 29 x 10 m y varía en los siguientes 2 m hasta 29 x 6 m, utilizando concreto reforzado de f'c=250 kg/cm^2.

La pila 3 está constituida por dos cuerpos cimentados cada uno en una zapata de 9 m de largo, 8 m, de ancho y 2.75 m de altura. Estas estructuras están ancladas al terreno por medio de 12 anclas con 7 torones de 13 mm de diámetro, para distribuir las cargas de la edificación.

Subestructura

El estribo 1 proporciona soporte y anclaje a los tirantes del lado de tierra (claro 1 y 2), los cuales se equilibran con los tirantes del tramo principal. Este es un cajón hueco cuyas dimensiones son de 30.65 m de largo, 25 m de ancho y 11.61 m de altura, muros perimetrales, muros intermedios en el sentido longitudinal y vigas diafragma en el sentido transversal, este estribo también funge como contrapeso del tramo principal.

La pila 2 es el apoyo principal, ya que soporta la mayor parte de las cargas y en sus pilones se anclan todos los tirantes; tiene una altura de 48.88 m al nivel del cabezal y una altura total de 124.31 m. Está constituida por una zapata de cimentación, el cuerpo de pila, el cabezal y el mástil de dos pilones unidos por una riostra.

El cuerpo de la pila tiene una sección hueca de 21.00 x 4.22 m con un espesor de 35 cm, teniendo dos huecos de 10.00 x 3.52 m cada uno, separados por un muro diafragma de 30 cm de espesor.

Para formar el cabezal, la sección de la pila aumenta hacia los lados variando de 21.00 x 4.22 m a 28.84 x 4.22 m. La sección sigue siendo hueca y tiene las mismas dimensiones. A la altura de los 13 m sobre el cabezal, la sección disminuye a los lados con la misma inclinación de los pilones, y se vuelve maciza entre las elevaciones, formando así una torre en forma de "H".

En la sección maciza se utilizaron 10 cables de presfuerzo con 19 torones de 15.90 mm de diámetro cada uno, tensados a 400 toneladas. El presfuerzo es del tipo postensado, por lo cual se dejaron ahogados en el concreto ductos flexibles para introducir los cables.

La construcción de los pilones se dividió en 31 etapas de colado, aproximadamente de 2.50 m cada una. Los pilones están ligados por una riostra de 2 m de ancho y 5 m de peralte. La resistencia del concreto fue de 300 kg/cm^2.

Para tener acceso al interior de los pilones, en la base de cada uno hay un paso hombre de 80 cm de diámetro. El ascenso hasta donde comienza la zona de anclaje se hace por una escalera de caracol con pisos de rejilla intermedios, y la parte restante, por una escalera marina que pasa por los huecos existentes en las losas de anclaje.

Para al caso de la pila 2 se utilizaron apoyos *Tetron CD/GL* o deslizante libre, que permite rotaciones y movimientos en todas las direcciones. El pistón de este apoyo está cubierto con una hoja de politetrafluoretileno sobre la que se desplaza una placa de deslizamiento. Dicha hoja tiene alvéolos llenos de grasa especial que asegura una lubricación permanente durante la vida del apoyo, y proporciona un coeficiente de rozamiento muy bajo.

La pila 3 tiene una altura total de 36.70 m. Está compuesta por dos cuerpos los cuales tienen una sección transversal hueca con espesor de pared de 40 cm, ancho de 2.50 m y un largo que varía de 3.07 m a 2.50 m. En la parte superior los cuerpos se unen por una riostra de 2.50 x 2.50 m. La pila 4 fue construida a 14.80 m de la pila 3, ésta cuenta con una altura de 17.80 metros.

El estribo 5 está constituido por una zapata de cimentación de 1 m de altura, a la cual se une un cabezal donde se apoyan las vigas de la superestructura. En la parte posterior, en sentido transversal, por un muro diafragma, unido perpendicularmente a cada extremo del muro diafragma se encuentran aleros.

Superestructura

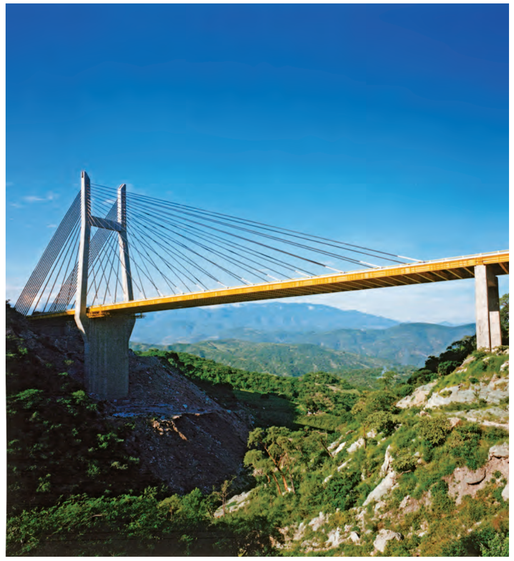
El puente Barranca el Zapote es una estructura atirantada; tiene un ancho total de 22.80 m, una longitud de 267.78 m y una altura de 85 m desde el fondo de barranca; el ancho de calzada es de 17 m con circulación en cuatro carriles y acotamientos a ambos lados de 0.5 m. La rasante tiene una pendiente de 5% y la carpeta asfáltica tiene 3 cm de espesor.

La superestructura cuenta con 4 claros, el primero que une al estribo 1 con la pila No. 2 de 59.70 m de longitud; el segundo es el claro atirantado de 175.43 m; el tercero y el cuarto son de 14.80 m, y de 17.85 m, respectivamente.

Está compuesta de 12 tramos y uno de cierre. Los tramos del 4 al 9 son de 24 m de longitud y cada uno está compuesto por dos dovelas de 12 m compuestas por dos trabes longitudinales y tres vigas puente de acero estructural A-36 en sección "I" a cada 4 m de distancia y cuentan con un tubo cañón a cada lado que sirve para anclar los tirantes.

El sistema de piso que se utilizó está formado por canales monten colocados entre las piezas de la superestructura, los cuales sirvieron como obra falsa ahogada en una losa de concreto armado con espesor de 23 cm.

En total, el puente tiene 56 tirantes, de los cuales 28 se anclan a cada pilón, formando 14 pares. Éstos se anclan por medio de los tubos cañón que se encuentran sujetados en el estribo 1 y en los pilones, o soldados a las vigas longitudinales de la superestructura. Los tubos cañón son de acero estructural; en uno de sus extremos llevan soldada una brida que sirve para unirlos con las vainas que cubren a los tirantes. Por el otro extremo van soldados a una placa de apoyo.



Izquierda: En la pila No. 2 se implantó un sistema antidespegue, con placas de acero A-36. El sistema está formado por cuatro topes que sujetan a la pieza puente para impedir el movimiento. Los topes fueron colocados a los extremos, así como a ambos lados de la pieza puente. Quedaron anclados al cabezal de la pila por medio de barras de acero con un diámetro de 32 milímetros. ©ICA. **Derecha:** La Autopista del Sol fue concebida con el propósito de difundir el modelo turístico y colocarlo en un ambiente competitivo para la entrada del siglo XXI. Está construida con las más avanzadas técnicas y especificaciones en vialidades rápidas, en el diseño de túneles y en estructuras de viaductos y puentes.

Puente Barranca El Cañón
1993

EJE TRONCAL
Acapulco-Veracruz

AUTOPISTA
México-Acapulco

UBICACIÓN
Chilpancingo-Puente de Ixtla
Km 236+000

ESTADO
Guerrero

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 260.80 m

No. DE APOYOS: 5

No. DE CLAROS: 4

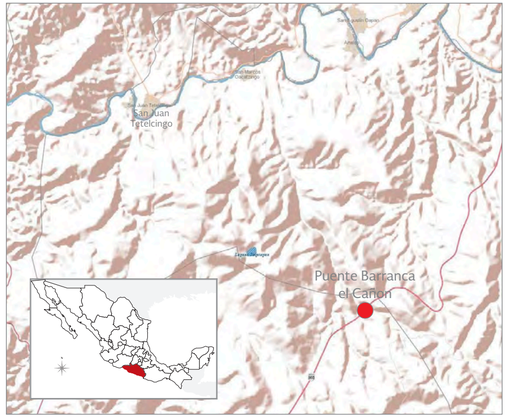
CLARO MÁXIMO: 166.40 m

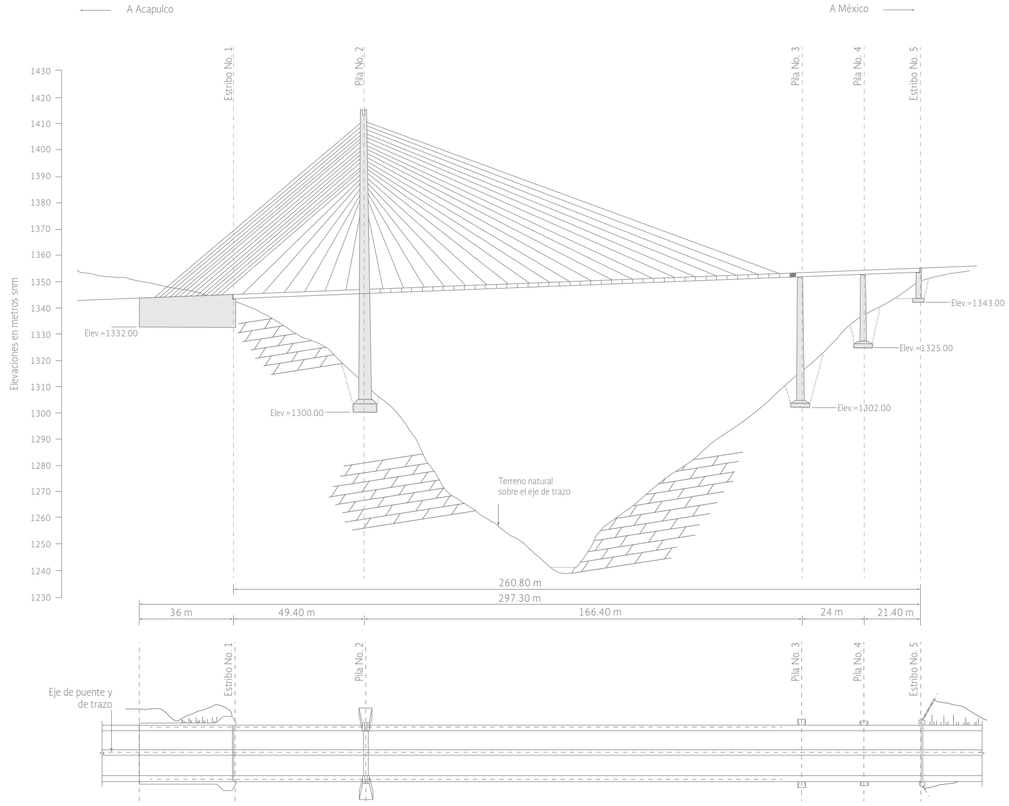
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 42 m

No. DE TIRANTES: 52

ANCHO TOTAL: 20.96 m

No. DE CARRILES: 4





La pila No. 2 es el elemento más alto y el que recibe la mayor parte del peso de la superestructura. Está formada por dos columnas unidas por dos vigas horizontales localizadas a diferentes alturas, las cuales permiten darle estabilidad al puente, sin necesidad de tener un pilón macizo. Se aprecia la torre grúa que sirvió para el suministro de materiales, así como la cimbra deslizante para realizar el lanzamiento de trabes, colocando los tirantes conforme avanzaba la construcción de la superestructura.

La construcción del puente Barranca El Cañón se llevó a cabo a la par que el puente Barranca El Zapote y tiene un diseño similar. El cuarto puente atirantado de la autopista Cuernavaca-Acapulco está ubicado en el tramo Chilpancingo-Río Balsas, en el km 134+784. Fue puesto en operación en julio de 1993.

Estudios preliminares

Se realizaron estudios topográficos, hidráulicos, de mecánica de suelos, de viento y de riesgo sísmico, los cuales arrojaron resultados del tipo de terreno, se destacaron importantes elevaciones y corrientes hidráulicas definidas.

También se hicieron sondeos geoeléctricos cada siete metros, que indicaron que las excavaciones tendrían que hacerse con ayuda de explosivos.

Como opciones de proyecto se consideró la construcción de un terraplén, un puente de características usuales y la modificación del proyecto geométrico original de acuerdo con la autopista. Estas alternativas parecían más económicas; pero al evaluarlas en conjunto con el alineamiento vertical y algunas cuestiones técnicas y constructivas condujeron a la mejor opción que fue la construcción de un puente atirantado.

Cimentación

En la etapa de la excavación para la cimentación del pilón No. 2, cuando se llegó al nivel de desplante, el tipo de material existente aguas abajo obligó a continuar la excavación hasta 8.40 m, con una mayor profundidad de lo planeado, para posteriormente rellenar utilizando concreto ciclópeo y alcanzar el nivel del desplante para la zapata marcado en el proyecto.

La cimentación del puente es superficial con base en zapatas de concreto reforzado. La zapata en la cual se apoya el pilón es de 10 x 29 m por 5 m de altura.

Subestructura

La subestructura del puente está conformada por dos estribos, dos pilas y un pilón principal en forma de H, con los elementos principales inclinados que se unen a dos travesaños, uno a 42.30 m y el otro a 93.20 m de altura; ambos tienen 5 m de peralte. Sobre el primer travesaño se apoya la superestructura.

Los brazos del pilón son de sección transversal variable con la altura y están unidos en su parte superior por un travesaño de concreto presforzado. La altura total del pilón es de 115.20 m. Para la construcción del pilón se utilizó concreto reforzado y una cimbra deslizante; los materiales se suministraron desde la base mediante una torre grúa. Es importante mencionar que en esta pieza están anclados todos los tirantes que sostienen a la superestructura.

La pilas No. 3 y No. 4 son también de concreto reforzado con menor altura, 50 m y 28 m, respectivamente, desde el nivel de desplante; en el sentido transversal forman un marco rígido.

Por su parte, el estribo 1 está formado por un muerto de concreto reforzado de 37.65 x 12.65 x 24.00 m, el cual trabaja como un contrapeso del claro mayor del puente debido a que éste no es simétrico. El estribo 5 fue construido empleando concreto reforzado y su característica principal es que está apoyado sobre el macizo rocoso con un muerto de anclaje.

Superestructura

La superestructura del puente Barranca El Cañón tiene una longitud total de 260.80 m, formada por cuatro claros: el primero, que va del estribo 1 al pilón, es de 49.40 m. Posteriormente se presenta el claro principal atirantado, el cual mide 166.40 m de longitud. Los otros claros son de 24 m (pila No. 3 a pila No. 4) y de 21.40 m (pila No. 4 a estribo 5), respectivamente.

Los dos tramos que conforman la parte atirantada tienen una sección transversal formada por dos trabes laterales longitudinales metálicas de sección I de acero

estructural A50. Estas trabes están unidas por piezas puente a cada 4 m de acero A36; los claros entre vigas transversales cuentan con largueros que sostienen una losacero; ésta funciona a su vez como cimbra para el colado de la losa superior de concreto reforzado de 20 cm de espesor con una resistencia de 400 kg/cm^2. El ancho total del puente es de 20.96 m, para cuatro carriles de circulación.

El claro principal comprendido entre el pilón y la pila No. 3 está sostenido por dos arpas de 13 tirantes con torones galvanizados de 15 mm de diámetro, cada una fijada al mástil de la pila No. 2. Cuatro tirantes quedan comprendidos en el mismo y el resto se ancla en la losa superior del estribo 1 que funciona como lastre para compensación de esfuerzos en el claro principal.

El tirante más largo tiene una longitud de 170.50 m. Los torones de cada tirante están contenidos en tubos de polietileno de alta densidad, resistentes a los rayos ultravioleta. El máximo número de torones en un tirante es de 37.

Para la construcción de la superestructura entre el estribo 1 y el pilón se realizó el habilitado y ensamblado de las piezas de acero para la longitud completa del tramo; lo anterior, realizado sobre el estribo ya terminado. Posteriormente se empujó el tramo sobre apoyos provisionales para asegurar su posición longitudinal, para a continuación desplazarlo verticalmente hasta su lugar definitivo. En este tramo la conexión entre dovelas fue con base en una soldadura.

El claro principal de la superestructura está formado por dovelas de 12 m de longitud por el ancho total del puente, las cuales se ensamblaron en un patio de fabricación; el transporte y colocación se efectuó con un dispositivo especial y gatos hidráulicos para desplazamiento. Adicionalmente se colocó una plataforma de apoyo que corre en la parte inferior de la superestructura, utilizada para unir las dovelas de forma atornillada con la finalidad de abatir tiempos en las conexiones.

El tramo entre la pila No. 4 y el estribo 5 se colocó de igual forma al tramo entre el estribo 1 y el pilón, con la observación que para este caso no se necesitó del apoyo intermedio ya que la pila No. 4 funciona de esa manera. La conexión entre dovelas se realizó con soldadura.

Previo al colado de la losa se realizó el emparrillado y la unión del tramo principal del puente con la pila No. 3. Por su parte, las vigas madre fueron unidas con soldadura. Para la construcción de la cimentación y pilas se abrieron caminos de acceso en la barranca; labor compleja pues las pendientes son muy pronunciadas, llegando en algunos lugares a ser totalmente verticales.

Puente Papagayo
1993

EJE TRONCAL
Acapulco-Veracruz

AUTOPISTA
México-Acapulco

UBICACIÓN
Chilpancingo-Puente de Ixtla
Km 42+420

ESTADO
Guerrero

TIPO DE PUENTE: Acostillado

LONGITUD TOTAL: 315 m

No. DE APOYOS: 5

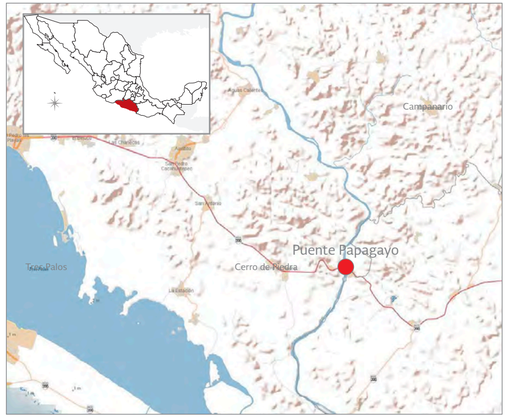
No. DE CLAROS: 4

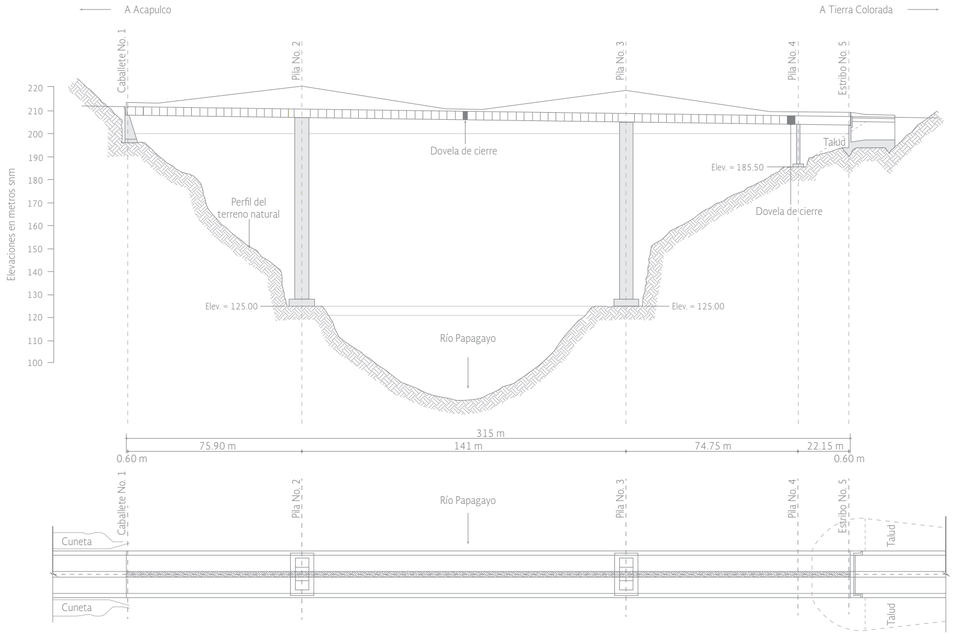
CLARO MÁXIMO: 141 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 78.79 m

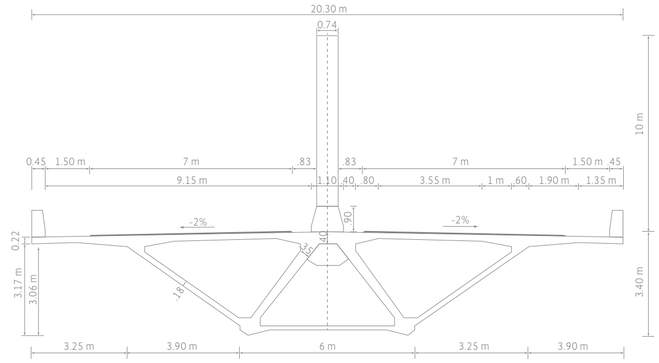
ANCHO TOTAL: 20.30 m

No. DE CARRILES: 4





Sección transversal



La ventaja de haber sido una obra financiada mediante el esquema de concesión fue que se mantuvo el avance programado y se adquirió la ingeniería necesaria para los cuatro puentes especiales de la autopista México-Acapulco, entre ellos el Papagayo. En el momento de su construcción, en México había apenas 20 puentes en los que se había aplicado el sistema de doble voladizo y una tecnología similar a la empleada en esta estructura, como los dispositivos móviles con los que se coló la superestructura, que habían sido utilizados en el puente Tampico.

Antecedentes y objetivos

Ante la necesidad de plantear nuevas estrategias de desarrollo y modernización por medio de campañas que fomentaran el turismo y devolvieran al puerto de Acapulco su época de bonanza económica como la tuvo en las décadas anteriores a 1990 a través del prestigio que le otorga el ser un paraíso vacacional, entró en vigor el proyecto de construcción de la Autopista del Sol.

A partir de 1989 se puso en marcha este proyecto, que a decir de los expertos, representa un parteaguas entre dos épocas del Guerrero contemporáneo, siendo el resultado de una visión anticipada y de acciones oportunas que tuvieron como objetivo trascender el modelo turístico y colocar al puerto en un ambiente competitivo ante la llegada del siglo XXI.

El puente Papagayo se encuentra ubicado dentro del estado de Guerrero, sobre el cañón del río del mismo nombre, a la altura del km 42 + 420 del nuevo trazo de la autopista Cuernavaca-Acapulco, con origen en el cadenamiento de la ciudad de Acapulco. Por ser este puente una parte de las estructuras que la conforman, esta autopista cuenta con cuatro carriles de circulación; posee una longitud total de 315 m y conecta las poblaciones de Puente de Ixtla, Nuevo Balsas, Chilpancingo y Tierra Colorada.

Estudios preliminares

Al realizar los estudios técnicos, como el correspondiente a la mecánica de suelos, se dictaminó que el proyecto necesitaría de adecuaciones importantes para poder realizar el desplante de los elementos portantes, pues el terreno presentaba condiciones de estabilidad distintas en cada uno de los puntos de donde se extrajeron muestras. Es en el eje No. 3 donde, al ensayar cuatro anclas de 5.7 y 10 m de profundidad, se detectaron oquedades en profundidades de entre 7.05 y 11.90 m, además de varias intercomunicaciones entre sí para lo cual se proyectó un tratamiento que mejorara las condiciones del subsuelo; asegurara el anclaje y evitara posteriores asentamientos indeseables para la estructura.

Para poder salvar un claro de 320 m, considerando la topografía del lugar y la altura del cañón que tendría que librar el puente, se concluyó que debía tratarse de una estructura fabricada en concreto que contara con dos apoyos principales, uno en cada margen del río y cuya distancia entre éstos (de 141 m) no permitiría que la superestructura fuera construida por medio de sistemas tradicionales, tales como el lanzado de trabes, pues éste permite tan sólo una longitud de operación comprendida entre 35 y 40 m. Tampoco era adecuado utilizar el método de lanzamiento por incrementos sucesivos ya que no soportan los esfuerzos originados por claros mayores a los 60 m y requieren una similitud entre claros próxima a 75% De acuerdo con estos análisis, la técnica más adecuada para la construcción de este puente sería la de doble voladizo en cada uno de los apoyos para lograr unirlos al centro del claro principal, así como en cada uno de los extremos del puente; es decir, sobre los estribos.

Fue en el anteproyecto donde esta idea tomó forma generando una subestructura con base en pilas gemelas fabricadas en concreto reforzado, arriostradas entre sí y desplantadas en una cimentación superficial. Posteriormente, se construyó la superestructura de dos cuerpos paralelos mediante dovelas en doble voladizo de sección variable, un estribo en la margen derecha del río y un caballete al otro extremo donde concluyen simétricamente los dobles voladizos, complementando el último tramo con muros de tierra armada.

Para lograr llegar a los distintos frentes de trabajo se trazó un camino de acceso sobre la margen izquierda del río lo que facilitó los trabajos de excavación. De la misma forma se aprovechó el material de rezaga para formar una plataforma de trabajo.

Los dispositivos usados para la construcción del puente Papagayo son propiedad de la SCT. Fueron usados en la construcción del puente Tampico y tuvieron que ser adaptados a la geometría de esta nueva superestructura. A las armaduras utilizadas se les incrementó la longitud y se reforzaron para ajustarlas al ancho de la superestructura de 20.30 m totales de los 16.10 m que tenía originalmente. Las adaptaciones y modificaciones se efectuaron por parte de la empresa constructora, supervisadas por el personal de la SCT y por el proyectista.

Cimentación

Como primer acercamiento, se tenía prevista una cimentación con apoyos fijos en forma de coyoteras de 15 m de profundidad para los estribos 1 y 5. Sin embargo, al realizarse los estudios geotécnicos se observó que la geología del terreno haría imposible los trabajos de ejecución puesto que se trataba de una roca intemperizada que no podría absorber las cargas sísmicas. De esta manera se procedió a rediseñar dichos estribos, determinando un amarre sísmico en el estribo No. 5, conformado por una cimentación compuesta por dos dentellones y una zapata en el sentido longitudinal del puente, de la cual arranca un muro central ubicado en el eje longitudinal del puente y uno en sentido transversal en donde descansa el alero que recibe a la superestructura. Para el estribo No. 1 se contempló una cimentación superficial con nueve anclas al terreno, de la cual parte un muro trapezoidal en forma de "H", con sección variable en donde descansa el alero que recibe al doble voladizo y parte de una cimentación anclada por medio de nueve barras roscadas de 10 m de profundidad desde una base de concreto ciclópeo empotrada en la ladera. Está auxiliado por una junta de

El programa original de trabajo presentado a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes consideraba un tiempo promedio de 15 días para la construcción de una pareja de dovelas. Pero con una mejor planeación en la ejecución de actividades en diferentes frentes, incrementando la fuerza de trabajo y prolongando los turnos, se logró reducir el ciclo a siete días en promedio. También se puso especial cuidado en puntos específicos —la dovela sobre pila y los cierres de los tramos en doble voladizo— donde se llevaron a cabo al mismo tiempo diferentes actividades, todas de gran importancia.

Arriba: Para comunicar el puente con el lado de acceso a Tierra Colorada; es decir, con el estribo No. 5, se realizó una losa de transición con 19 m de longitud que quedó apoyada en el estribo. El estribo lo forma un muro central ubicado en el eje longitudinal del puente, desplantado en una zapata empotrada transversalmente por dos dentellones de concreto armado. El objetivo de la losa es evitar los asentamientos en los aproches debido a los efectos de variaciones en la superestructura y a causa del tránsito vehicular. **Enfrente:** En la realización del puente Papagayo se consolidaron innovaciones técnicas y propuestas de proyecto, que en décadas posteriores se volvieron a aplicar por la eficiencia que representó en la construcción, en una geografía altamente complicada.

dilatación y, en ambos casos, con topes de neopreno y apoyos multidireccionales.

Los trabajos de mejoramiento del terreno en la zapata No. 3, por medio de inyecciones que se usan para la creación de pantallas impermeables en presas, inician su utilización en puentes a través de los anclajes definitivos de las pilas principales pues, al crear un bulbo de adherencia en cada cimiento, es posible obtener una mejor superficie de apoyo a mayor profundidad, que se traduce en poder proyectar claros más cortos y cercanos a las márgenes de los ríos, garantizando evitar la socavación en el suelo bajo las zapatas además de no realizar excavaciones excesivas para las mismas.

Cabe mencionar que con esta técnica se logró que la ejecución del anclaje fuera independiente de la construcción de la estructura, situación que no afectó la planeación de la obra por presentarse como una actividad aislada en la programación.

Subestructura

Está formada por dos pilas principales de concreto armado con sección de cajón hueca y un espesor de pared igual a 45 cm. Se encuentran ubicadas en cada uno de los márgenes del río, con alturas de 78.79 m en la pila No. 2 y de 76.89 m en la pila No. 3 y se apoyan sobre una cimentación superficial anclada al terreno mediante 156 barras roscadas de 32 mm de diámetro por 18 m de longitud distribuidas alrededor de cada zapata y proyectadas en tres ángulos diferentes. Las dimensiones de las pilas son de 6.00 x 14.12 m y de 6.00 x 13.92 m, respectivamente. Cuenta además con una pila auxiliar de concreto armado en el eje No. 4 con dimensiones de 1.40 x 1.40 m de sección y 17 m de altura total.

Superestructura

La longitud total del puente es de 315 m con una altura máxima sobre el río de 85 m. El ancho de corona es de 20.30 m y aloja dos carriles en cada sentido de circulación con pendientes transversales del orden de 2% y 1.55% en sentido longitudinal.

El proyecto del río Papagayo incluía además la construcción de la presa La Parota, situada a 30 km de Acapulco, en el estado de Guerrero. Es por eso que, de acuerdo con el nivel de aguas máximas de ésta, se observó que parte de la subestructura quedaría sumergida dentro del río, por lo que fue preciso diseñar una superestructura que constara de un solo cuerpo. Esto se logró a través de dovelas fabricadas por medio de dispositivos móviles de colado, método conocido como el sistema constructivo de doble voladizo, el cual consiste en instalar por medio de obra falsa una dovela de 7.20 m sobre cada pila principal para así poder colocar una pareja de dispositivos móviles de colado que fabricarán el resto de las dovelas en tramos de 3.50 m en forma simétrica hacia los extremos para lograr conservar el equilibrio; se auxilian por medio de una costilla central de concreto armado que tiene como función alojar el postensado longitudinal del puente, uniendo de esta forma cada pareja de dovelas como si se tratase de un sistema de atirantado y amarra los dobles voladizos en el centro del claro principal colocando el presfuerzo en la parte inferior de la dovela.

Estas nuevas modificaciones indicaban que deberían construirse seis dovelas adicionales partiendo de la pila No. 4 en dirección al estribo No. 5, lo que implicaba ampliar el programa de obra por cuatro meses más. Para poder abatir este tiempo de ejecución se optó por construir la misma sección de dovela en doble voladizo, colada con obra falsa y utilizando cimbra tradicional de una longitud de 24.50 m, solamente se modificó el presfuerzo longitudinal del puente.

La utilización de la costilla donde se aloja el presfuerzo longitudinal del puente resultó ser una solución ideal, no sólo por elevar la superestructura y salvar el nivel de aguas máximo de la presa La Parota, sino que, a su vez, permitió tener una sección constante de dovelas en doble voladizo cuyo avance en ciclos de colado fue más rápido al contemplado originalmente, gracias a que no se debieron modular los dispositivos móviles de colado en cada ciclo y a la continuidad que representó no tener que colocar ductos de presfuerzo en las nervaduras exteriores de cada dovela.

Puente Calapa
1993

EJE TRONCAL
Puebla-Ciudad Hidalgo

AUTOPISTA
Cuacnopalan-Oaxaca

UBICACIÓN
Tehuacán-Nochixtlán
Km 84+500

ESTADOS
Puebla y Oaxaca

TIPO DE PUENTE: Empujado

LONGITUD TOTAL: 342 m

No. DE APOYOS: 6

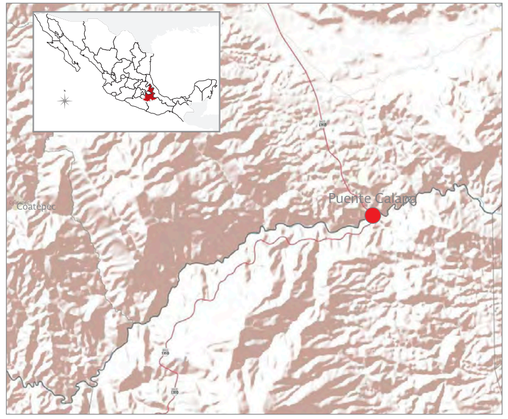
No. DE CLAROS: 5

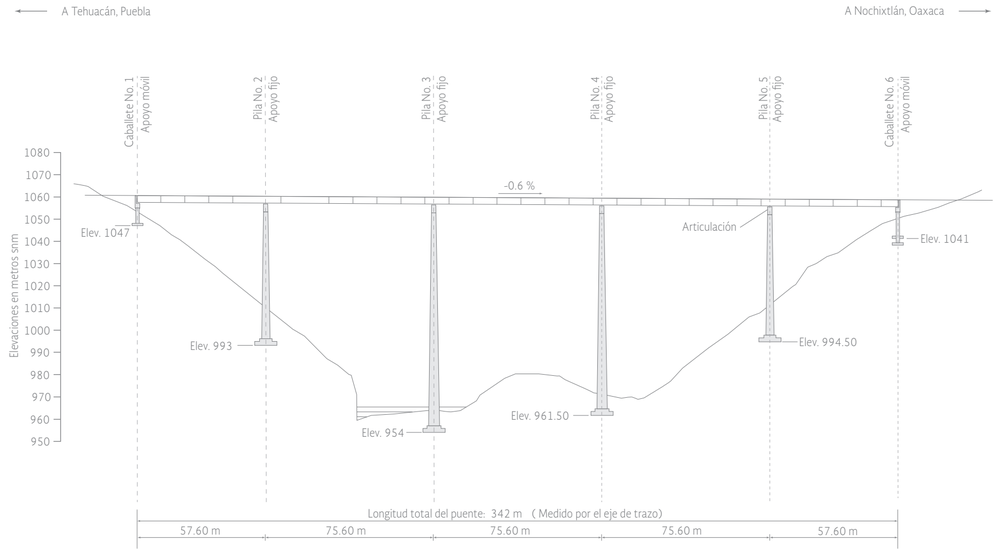
CLARO MÁXIMO: 75.60 m

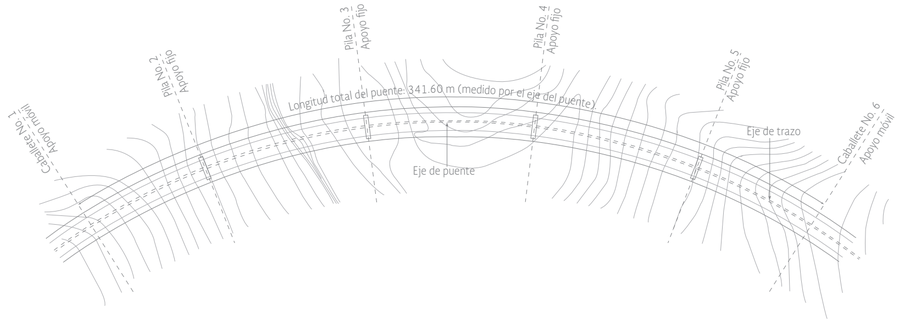
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 102.28 m

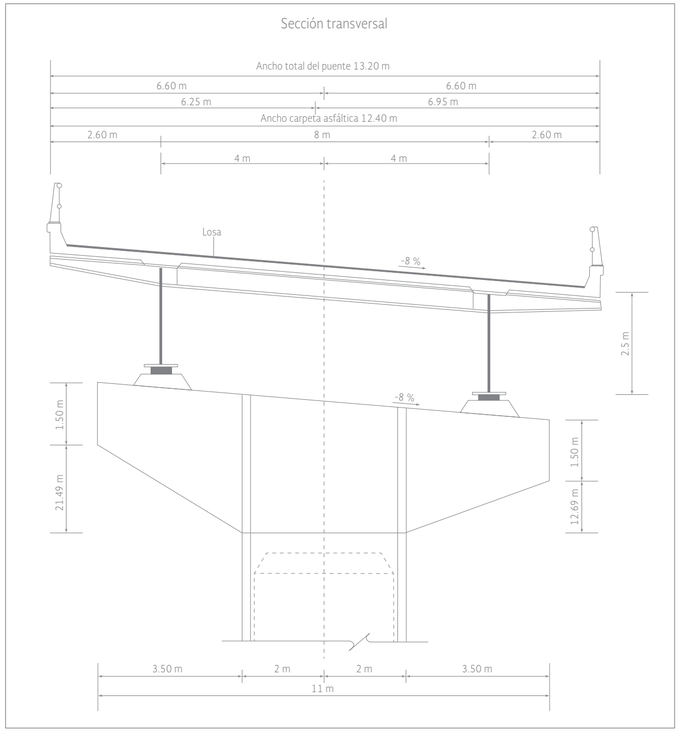
ANCHO TOTAL: 13.2 m

No. DE CARRILES: 2









Enfrente izquierda: Para recibir a las trabes longitudinales que se posicionaron con una inclinación de 8% se colocaron placas de ajuste que proporcionaran contacto horizontal con los dispositivo de apoyo móviles. **Enfrente derecha:** A un extremo del eje No. 6, fue apremiante la construcción de un parque de fabricación y estructura para empujado, en donde cada uno de los componentes de la superestructura fueron armados y posicionados para, posteriormente, someterlos a un empuje por medio de gatos hidráulicos hasta alcanzar su ubicación sobre cada una de las pilas. ©FICA. **Enfrente abajo:** Las trabes longitudinales y piezas puente se encuentran reforzadas por medio de contraventeos en cada vano, elementos que aumentan su rigidez estructural, tanto para fines constructivos como de funcionamiento. ©FICA. **Página 94:** ©FICA.

La autopista Cuacnopalan-Tehuacán-Oaxaca une a la capital del estado de Oaxaca con las ciudades de Puebla y México. Se trata de una obra concesionada por parte de la SCT que cuenta con altas especificaciones técnicas a lo largo de un camino con 246 km de longitud. La empresa encargada de su construcción tuvo a su cargo la prestación de servicios profesionales para llevar a cabo la coordinación integral de la información, la planeación y el control de avance de dicho proyecto, el cual incluyó la construcción de tres puentes especiales que suman una longitud acumulada superior a los 1000 m. Estos puentes fueron fabricados mediante un sistema constructivo del tipo empujado con acero estructural y claros de hasta 76 m. También se construyeron nueve puentes con trabes prefabricadas de concreto presforzado y 24 pasos vehiculares que acumulan una longitud de hasta 1 200 metros.

Es dentro de estas tareas de infraestructura que se llevó a cabo el proyecto del puente Calapa, ubicado en la frontera entre los estados de Oaxaca y Puebla, sobre la carretera Cuacnopalan-Oaxaca, a la altura del kilómetro 84+426 y concentrado en el subtramo que se dirige de la ciudad de Tehuacán hacia la población de Nochixtlán; atraviesa una barranca con más de 300 m de longitud y 100 de profundidad, y contribuye a mejorar el transporte terrestre de la región en conjunto con otros puentes como el Santa Lucía, ubicado a unos poco kilómetros de este sitio.

Cimentación

La cimentación fue diseñada con referencia en una capacidad de carga en el terreno de hasta 100 t/m² y consistió en la elaboración de zapatas aisladas con dimensiones rectangulares fabricadas con concreto reforzado con una resistencia máxima de 250 kg/cm².

Subestructura

La subestructura la componen un total de seis elementos: dos estribos –sobre el eje No. 1 y 6– y cuatro pilas huecas en forma trapezoidal de 4 m de ancho y alturas que varían desde los 63.87 m en el eje No. 5, hasta los 102.28 m en el eje No. 3, fabricadas también con concreto reforzado de 250 kg/cm².

Sobre las pilas se levantaron los cabezales en sección trapezoidal con un peralte aproximado de 3.65 m con una pendiente de 8% hacia el interior como medida preventiva de accidentes por tratarse de un tramo en curva. Además, se colocaron diafragmas en los apoyos sobre los que se colocan las trabes que sirven para rigidizar los contraventeos horizontales en cada una de las pilas.

En el caso de los estribos se colocaron apoyos móviles de neopreno con dureza *Shore-60* que les permite realizar desplazamientos restringidos de 1.5 cm en el sentido longitudinal y de 1 cm en el sentido transversal para unificar el tramo del puente a los extremos con el tramo carretero.

Superestructura

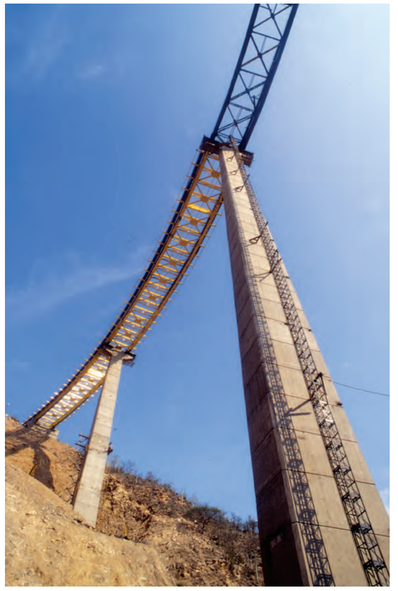
El claro que salva la superestructura cuenta con una longitud total de 342 m repartidos entre 5 claros, de los cuales 3 –los centrales– constan de 75.6 m y los 2 restantes se prolongan en un tramo de 57.6 m para encontrarse con la carretera Cuacnopalan-Oaxaca en ambas direcciones en donde se colocaron juntas de dilatación con una capacidad de desplazamiento de hasta 16 centímetros.

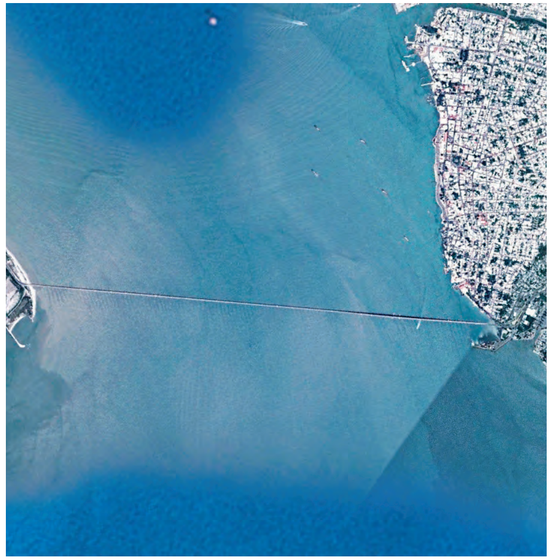
Esta superestructura es mixta y está constituida por trabes y piezas puente que se encuentran integradas por 32 piezas de acero estructural de 10.80 m de longitud, colocadas a cada 3.60 m de distancia entre ellas. Se empleó el sistema constructivo de empujado por medio de gatos hidráulicos hasta alcanzar su posición definitiva sobre cada uno de los apoyos previamente fabricados (pilas).

Cada una de las trabes principales del puente mantiene 2.5 m de peralte. Fueron hechas con acero estructural ASTM grado 50 tanto en los patines como en las almas que las conforman. El patín superior de cada una de estas trabes tiene una inclinación de 8% en dirección sobre el total de su longitud mientras que la pieza puente mantiene el mismo porcentaje de inclinación pero únicamente en el sentido longitudinal.

Sobre estos elementos de la superestructura se realizó el colado *in situ* de una losa de concreto f'c=300 kg/cm², con 20 cm de espesor sobre la que posteriormente, se tendió una carpeta asfáltica como superficie de rodamiento de 3 cm de espesor que le proporciona una pendiente vertical con un valor de 6% y un valor de 10% para la pendiente en horizontal del tablero.

Por otra parte, el ancho total de la calzada es de 13.20 m para dar paso a dos carriles de circulación para automóviles de 3.85 m de ancho con su correspondiente espacio para acotamiento en ambos sentidos, la pendiente vertical es de -0.6%, y la horizontal de -10.0%, sugiriendo una velocidad de circulación sobre el puente de hasta 90 km por hora.





Puente Zacatal
1994

EJE TRONCAL
Puebla-Progreso

AUTOPISTA
Villahermosa-Ciudad del Carmen

UBICACIÓN
Carretera Villahermosa-Ciudad del Carmen
Km 165+000

ESTADO
Campeche

TIPO DE PUENTE: Trabes

LONGITUD TOTAL: 3697.70 m sin accesos

No. DE APOYOS: 142

No. DE CLAROS: 141

CLARO MÁXIMO: 48 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 16 m

ANCHO TOTAL: 13 m

No. DE CARRILES: 2

El puente Zacatal se localiza en la zona suroeste de la isla del Carmen, Campeche, uniendo a ésta con la península de Atasta. La llamada península de Atasta es recorrida de oeste a este por la carretera federal No. 180 que entra al estado de Campeche en el poblado conocido con el nombre de Campechito y toca los poblados de Nuevo Progreso, San Antonio Cárdenas, Atasta, Puerto Rico, Punta Xicalango y finalmente Punta Zacatal; el puente inicia en el km 165+000 de la carretera Villahermosa-Ciudad del Carmen, cruzando la laguna de Términos. Esta región se caracteriza por ser de las de menor sismicidad del país y por estar expuesta a frecuentes embates de fenómenos meteorológicos como huracanes y nortes.

Con una longitud de 3697.70 m, el puente es el más largo de Latinoamérica y es transitable en dos carriles por toda clase de vehículos, forma parte de la carretera federal costera del golfo de México No. 180.

El puente Zacatal fue terminado el 24 de noviembre de 1994 y puesto en funcionamiento por Carlos Salinas de Gortari durante su gestión como presidente de los Estados Unidos Mexicanos.

Antecedentes y objetivos

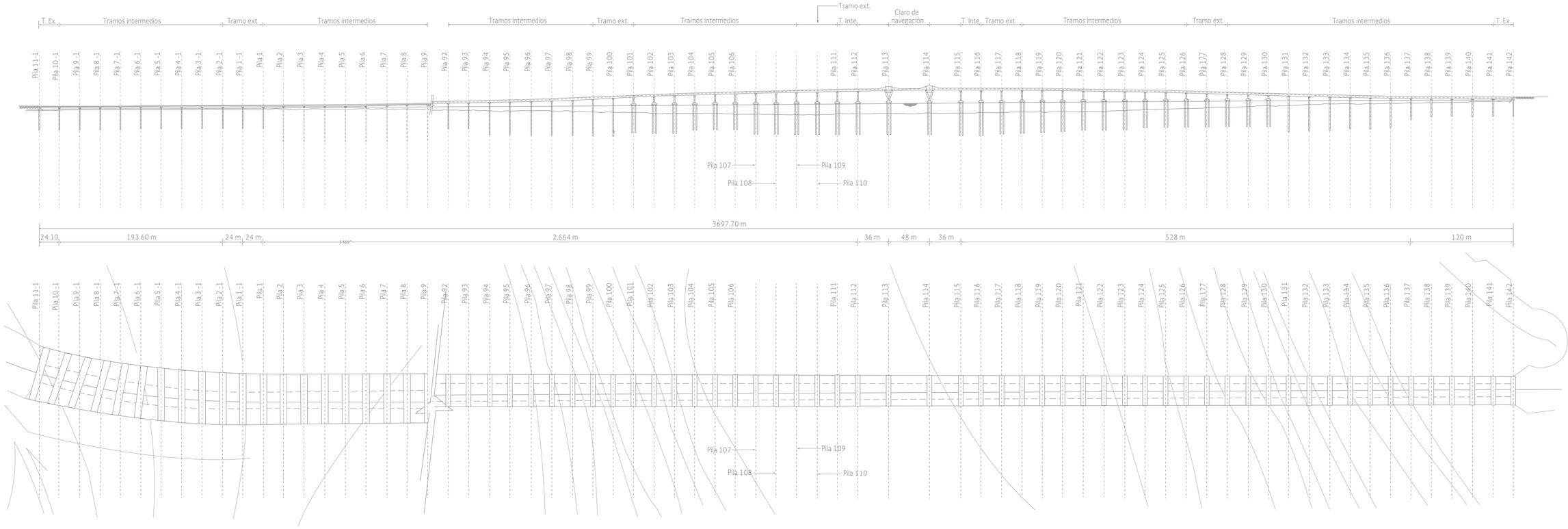
Anteriormente, el cruce de Zacatal a Ciudad del Carmen se realizaba mediante el uso de un chalán o transbordador, que operaba de las 4:00 a las 23:00 horas iniciando sus recorridos en el sentido Ciudad del Carmen-Zacatal y finalmente Zacatal-Ciudad del Carmen; el tiempo de recorrido en un sentido, esto es el transcurrido entre la carga, el traslado y la descarga de vehículos en una dirección, era de una hora, lo que indica que cada dos horas se realizaba un viaje en el mismo sentido, originando demoras al usuario, las cuales se vieron incrementadas en periodos de máxima demanda y cuando las condiciones atmosféricas eran desfavorables (durante lluvias o tormentas), ya que por seguridad el servicio se suspendía totalmente. En periodos de alta demanda el tiempo promedio de espera para que los automóviles fueran cargados en el transbordador era de 18 a 20 minutos por vehículo lo cual generaba una demora vehicular de 1h con 20 minutos.

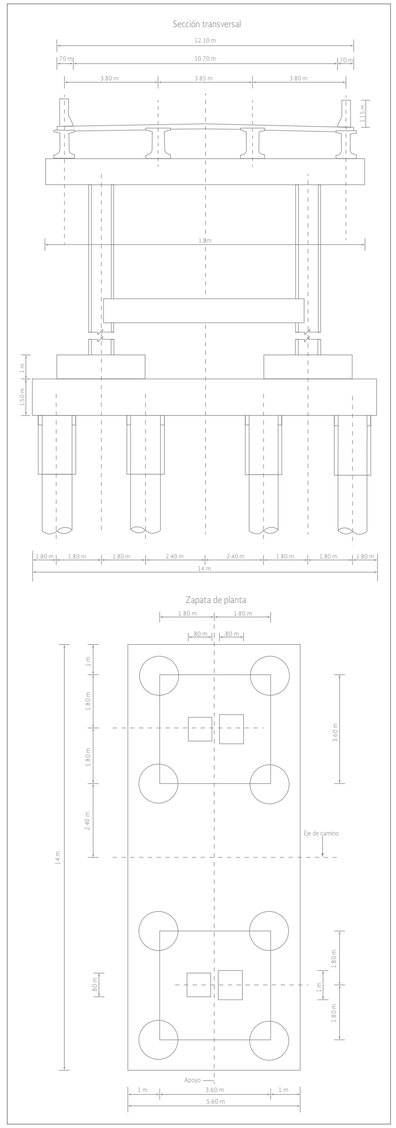
El número promedio de vehículos transportados en el transbordador Zacatal-Ciudad del Carmen en el año de 1989 fue de 685 vehículos por día, dando un total

El puente Zacatal comunica a la Isla del Carmen con tierra firme, hacia la ciudad de Villahermosa, y complementa el enlace con el otro brazo del mar hacia la ciudad de Campeche. La infraestructura del puente permitió la vialidad a la carretera costera del Golfo, generando una nueva alternativa de comunicación para la región, además de acortar el tiempo de traslado de un lugar a otro, de seis horas a dos. También se eliminó el uso de la panga, que además de tener una capacidad limitada, dependía de las condiciones climáticas para su funcionamiento. Por su longitud de 3861 m, que incluye los accesos, destaca como el puente más largo en América Latina. ©FICA.

A Villahermosa

A Ciudad del Carmen





de 250 196 vehículos transportados en ese año por medio de transbordadores. Los transbordadores representaban un peligro para los usuarios, ya que si las condiciones climáticas no eran adecuadas podría ocurrir un accidente como el hundimiento de la panga "Campeche" el 22 de agosto de 1980, lo cual fue también un factor determinante para la aplicación del proyecto y su rápida ejecución.

Con la construcción del puente se establecería un vínculo de unión entre la isla del Carmen y el resto del país, coadyuvando al desarrollo económico, político, social y cultural de Ciudad del Carmen, Campeche. La integración de esta ruta establecería un importante eje de transporte carretero que recorre de norte a sur el este del país por medio de la carretera federal México No. 180.

Después de diversos estudios técnicos y económicos se presentarían dos alternativas de solución para mejorar el funcionamiento de la carretera: la primera era aumentar el número de transbordadores Zacatal-Isla del Carmen; la segunda era construir una estructura que conectara estos dos lugares.

Alternativas de localización del puente Zacatal

Alternativa cero: Esta alternativa era la opción de seguir operando el cruce con transbordadores, considerando sólo los trabajos relacionados con la conservación y el mantenimiento de la infraestructura y del equipo existente.

Debido a que esta alternativa no requería la realización de construcción alguna, se la consideraba la de menor inversión inicial y sólo involucraba el pago de una cuota por el concepto de transporte en panga; se puede decir que su mantenimiento y operación son autofinanciables: En contrapartida se destaca que presenta la gran desventaja de suspender el servicio de transporte entre las 00.00 y las 4:00 h, además de los periodos en los que debido a cuestiones atmosféricas adversas la navegación marítima se interrumpe.

Alternativa uno: Proponía la construcción de un puente que uniera Zacatal con el extremo suroeste de la isla del Carmen, en las inmediaciones de Playa Manigua. Se propuso una estructura con una longitud de 3 782 m, y los accesos al puente sumarían 1 200 m. Debido a su ubicación cercana a la laguna, en la cual sólo transitan embarcaciones de bajo calado, el espacio libre vertical máximo requerido asciende a los 16.00 m sobre el nivel medio del mar.

Adicionalmente a esta obra y para canalizar el tránsito que circula por la carretera México No. 180 fue necesario el acondicionamiento de 6 750 m de vialidad a lo largo del desarrollo de la avenida Fortalecimiento Municipal para unirla con la carretera Ciudad del Carmen-Campeche.

Esta alternativa ofrecía los beneficios de tener una estructura con una longitud más corta y con menor altura libre vertical, así como un mejor aprovechamiento de la vialidad existente en ambos extremos del puente. El puente se alojaría en una zona en la que el valor de la tierra no era muy alto y la distancia de recorrido para conectar el puente Ciudad del Carmen-Campeche sería más corta.

Por ubicarse en la entrada de la laguna de Términos, que en la mayor parte de su extensión tiene profundidades que no rebasan los tres metros, y no permite la navegación de embarcaciones de gran calado, sólo requiere una altura libre vertical máxima de 16 metros.

Debido a su ubicación, tanto el puerto de abrigo como los muelles del litoral poniente de la isla no se verían afectados en sus operaciones, las cuales podrían realizarse sin peligro de colisiones con alguno de los elementos de la subestructura del puente. Asimismo, permitía la preservación de los terrenos más aptos para el crecimiento urbano de la isla, así como de aquellos susceptibles a desarrollarse turísticamente.

Alternativa dos: Esta alternativa propuso ubicar la estructura uniendo Zacatal con el extremo noroeste de

Enfrente: En las zonas centrales del puente, el montaje de las vigas se hizo con la ayuda de un chalán sobre el cual quedó montada la grúa de izaje, en la que fueron dispuestas las trabes prefabricadas para colocarlas en el tramo correspondiente. ©FICA. **Abajo:** En otras secciones, las vigas se montaron con ayuda de vigas lanzadoras que iban avanzando conforme se encontraran las secciones ya colocadas. ©FICA.

la isla, en las inmediaciones de la Playa Norte. La longitud de la estructura propuesta asciende a 3 998 m; los accesos al puente suman 1 690 m. Por ubicarse al norte del puerto de abrigo, sería necesario proveerlo con un espacio libre vertical de 40 m sobre el nivel del mar, con el fin de permitir el paso a las embarcaciones de gran calado que provinieran o se dirigieran al puerto, lo cual requería de mayor espacio vertical. También sería requerida una estructura de mayor longitud, lo que repercute elevando el costo de la obra.

Además de la edificación del puente, era necesario considerar la construcción de 8 200 m de vialidad para unir el puente con la carretera Ciudad del Carmen-Campeche. La vialidad de acceso oriente se localizaba muy cerca de la playa Norte, que es el balneario natural de Ciudad del Carmen, y el que mayor potencial de desarrollo turístico presenta, lo cual generaría problemas de afectaciones y contaminación ambiental. Otra de las desventajas de la construcción de esta opción sería el costo por demoras ya que se consideró que en los dos años de construcción habría pérdidas económicas por la realización de la obra.

Elección de la ubicación del puente

Una vez evaluadas las alternativas de solución para la ubicación del puente fueron comparadas arrojando los siguientes resultados en los indicadores económicos:

La alternativa uno presentaba menores costos de construcción, de operación y de transporte, significando la alternativa que menor inversión representaba.

En lo referente a la alternativa dos presentaba un valor negativo, lo que significa que no tendrá beneficios netos al final de la vida de proyecto considerada.

Dado que aumentar el número y frecuencia de transbordadores no constituía una solución definitiva al problema actual, se optó por elegir la alternativa uno ya que la ubicación del puente permitiría las mejores características geométricas en la parte central de la estructura, por su menor longitud total, mejor aprovechamiento de la vialidad existente en ambos extremos, sin requerir de afectaciones importantes y, además no interferir con las maniobras operativas de las embarcaciones que unen el puerto de Ciudad del Carmen, disminuyendo el peligro de una colisión de éstas con algún elemento de la subestructura del puente. En cuanto se acordó la viabilidad del proyecto la Secretaría de Comunicaciones dio comienzo a los trabajos.

Cimentación

La subestructura se resolvió a base de elementos prefabricados como los pilotes de acero de 1.22 m de diámetro y 13 cm de espesor de pared cada uno. La profundidad de hincado de estos pilotes es en promedio de 20 m, excepto en la zona aledaña al canal de navegación que permite el paso de embarcaciones en el cual la profundidad de hincado llegó hasta los 31 m, de acuerdo con los planos del proyecto.

Subestructura

La subestructura del puente Zacatal está formada por 142 apoyos con tramos de 31 m de longitud cada uno, excepto el tramo de navegación que tiene un largo de 48 m. De los 142 apoyos se tienen varios tipos de pilas con un número diferente de pilotes.

Las dos pilas principales (98 y 99) son en forma de "V", las cuales cuentan con columnas de sección rectangular de 0.80 x 1.30 m; cada apoyo cuenta con un cabezal el cual sostiene cuatro vigas de cajón de concreto presforzado AASHTO tipo IV. Estas pilas están dotadas de protecciones laterales para la zapata.

Las pilas tipo en la zona alta del puente están formadas por cabezales de concreto reforzado de 1.10 x 10.60 m, sobre dos columnas de concreto reforzado de sección circular de 0.90 m de diámetro, apoyados en dados y zapatas de concreto reforzado de 1.00 m de peralte cada uno.

Otro tipo de pilas en la zona alta son aquellas que cuentan con riostra intermedia de 0.60 x 0.90 m entre las columnas de 0.90 m de diámetro apoyadas en dados y zapata de concreto reforzado. Los apoyos de la zona alta del puente fueron anclados con cuatro pilotes metálicos de 1.22 m de diámetro cada uno.

En los ejes 33, 34, 35 y 36, el puente tiene pilas especiales en la zona baja del lado de Villahermosa. Están formadas por cabezales de concreto presforzado de 2.40 x 17.80 m y se apoyan en cinco pilotes metálicos de 1.22 m de diámetro cada uno.

Cuenta con apoyos de neopreno tipo móvil de 10.50 cm de espesor, así como con 124 losas de concreto postensado. Los diafragmas y bloques de anclaje para la unión de vigas son de concreto reforzado.

Superestructura

El puente está en su totalidad formado con elementos prefabricados y tiene una superficie del tipo hiperestático, constituido por tramos de concreto reforzado, con juntas de expansión en sus extremos.

Cada tramo se integra por cuatro vigas prefabricadas pretensadas AASHTO tipo IV modificada en la planta de fabricación y postensadas en obra, después de colada la losa para dar la continuidad respectiva; en total son 496 trabes AASHTO y ocho trabes de cajón. La superficie de rodamiento se logró con base en una carpeta de concreto asfáltico.

La superestructura tiene un ancho total de calzada de 9 m y acotamientos individuales de 1.00 m de ancho en ambos hombros, así como guarniciones extremas para dar un ancho total de 9.80 metros.

Enfrente: El puente permite un ahorro de 70 km, equivalentes a dos horas en el tramo comprendido entre las ciudades de Villahermosa y Campeche, vía Escárcega; o bien varias horas de recorrido por otra ruta desde Ciudad del Carmen. El recorrido final de un extremo a otro de El Zacatal es de aproximadamente cinco minutos. El tiempo total para la conclusión de la obra fue de 10 meses, obteniendo un avance de 400 m por cada mes de construcción. En marzo de 2011 se integró a la estructura un espectáculo de luces. ©FICA.

Puente Papaloapan
1995

EJE TRONCAL
Puebla-Progreso

AUTOPISTA
Cosamaloapan-Cosoleacaque

UBICACIÓN
La Tinaja-Cosoleacaque
Km 85+980

ESTADO
Veracruz

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 422.37 m

No. DE APOYOS: 4

No. DE CLAROS: 3

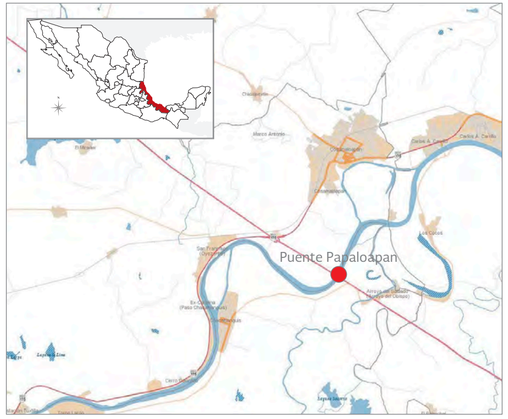
CLARO MÁXIMO: 203 m

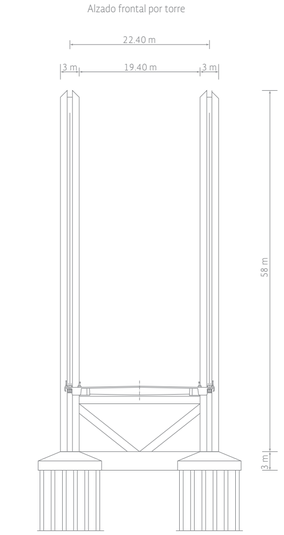
ALTURA MÁXIMA DE PILÓN: 58 m

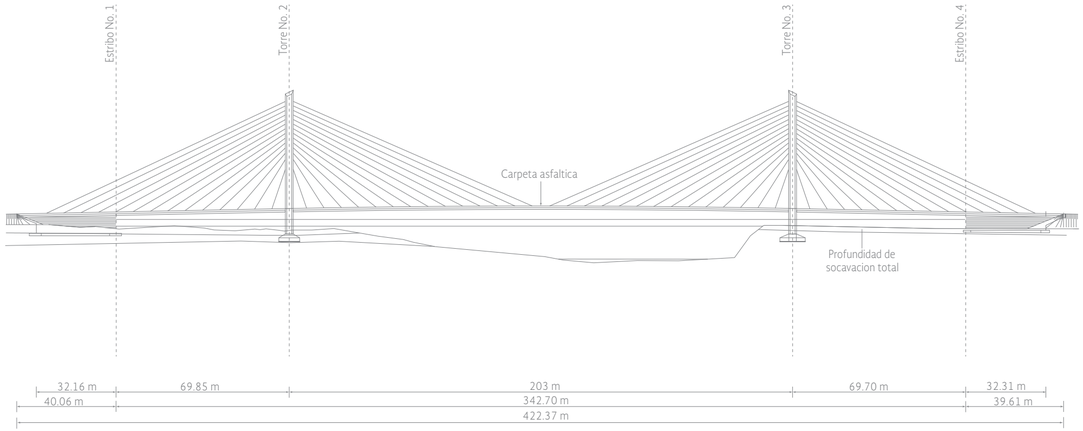
No. DE TIRANTES: 112

ANCHO TOTAL: 22.4 m

No. DE CARRILES: 4







Izquierda: Construcción de pilones con el método convencional de armado de varilla y colado por tramos, utilizando cimbra de madera y andamios metálicos. No se utilizó maquinaria especial para la construcción de éstos. La colocación de los tirantes tuvo lugar de manera simultánea y se emplazaron simétricamente conforme era construido el tablero de la superestructura, tomando como eje los pilones. **Derecha:** El planteamiento de la obra fue pensado simétricamente para no generar momentos que pudieran dañar la estructura. El puente no requirió de apoyos provisionales intermedios ya que el atirantamiento ayuda a que la estructura mantenga un equilibrio hasta el punto de unión de los tramos.

El puente Río Papaloapan se localiza en el km 85+980 de la autopista La Tinaja-Acayucan en el estado de Veracruz. Cruza el río Papaloapan cerca de la ciudad de Cosamaloapan. Es del tipo atirantado y tiene cuatro semi-arpas simétricas en cada uno de los planos laterales, que son soportadas por dos torres con dos pilas laterales en cada una. El puente fue construido en el año de 1994 y se puso en servicio en 1995 bajo la administración federal.

Antecedentes y objetivos

El puente Río Papaloapan está constantemente sometido a cargas vivas generadas por los vehículos que circulan en esa vía de comunicación y por los vientos. No existen cargas vivas producidas por terremotos debido a que el puente está constituido en una zona no sísmica.

El 5 de enero del año 2000, el puente Río Papaloapan presentó una falla en el dispositivo de soporte superior del anclaje del tirante No. 11 de la torre 3 derecha, lado aguas arriba. La falla consistió en la fractura de la botella en una zona cercana a la soldadura con la placa de soporte, la cual se presentó bajo condiciones de operación normal sin que existiera algún antecedente de sobrecarga o condición anómala de trabajo.

Se realizaron estudios experimentales de vibración, utilizando un sistema de vibraciones portátil y un acelerómetro de baja frecuencia con un intervalo de frecuencias de 0,5 Hz a 1000 Hz. Para los 112 tirantes, el acelerómetro se colocó en posición perpendicular al tirante sobre la cubierta antivandálica, en la parte más alta posible y en el plano que forman las arpas.

Cimentación

La cimentación está formada por zapatas aisladas con una altura de 3.00 m, cada pila cuenta con dos zapatas correspondientes a cada columna. Las zapatas están unidas por una contratrabe de concreto reforzado para evitar modificaciones estructurales por causas naturales.

Las zapatas cuentan con una cimentación profunda con base en pilotes anclados de 10 m a 12 m de profundidad.

Subestructura

Esta formada por dos pilas de concreto reforzado con una altura de 9.00 m con refuerzos transversales.

Cuenta también con dos estribos con una longitud máxima de 32.31 m los cuales también tienen atirantamiento de cinco cables por estribo, formando así un contrapeso para el claro mayor de la superestructura.

Superestructura

El puente Río Papaloapan cuenta con una superestructura continua. Tiene una longitud de 422.37 m y un ancho constante de 22.40 m para cuatro carriles de circulación; el claro principal que salva esta estructura es de 203 m. Los pilones son de 58 m de altura total desde el inicio de la subestructura. Sus mástiles tienen una altura de 49 m. Está sostenido por 112 tirantes, en forma de abanico o semiarpas. Las torres que sostienen a las anclas superiores de las cuales cuelgan los cables o tirantes son de tipo H.

El número de torones que tiene cada uno de los 112 tirantes es de mínimo 14 y máximo 37. El número de torones para casi todos los tirantes está de acuerdo con los datos de diseño, a excepción de los tirantes de las semiarpas 5 y 6, que tienen 37 torones, en lugar de los 32 y 30 que por diseño les corresponde, respectivamente.

El diseño único del sistema de anclaje superior de los cables fue desarrollado por *Astiz* y consistió en una placa de acero soldado al elemento de anclaje, el cual fue de forma cilíndrica en un lado donde quedó enroscado y soldado al elemento de anclaje.

Este puente fue construido mediante el sistema de empujado mediante cimbras desplazables ubicadas en cada uno de los extremos del río.

Menciones

Este puente obtuvo el Premio Lieberman 1996, otorgado a la mejor obra de concreto de ese año por parte de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC).

El río Papaloapan posee un inmenso caudal y es uno de los más importantes de México, está ubicado entre los estados de Oaxaca y Veracruz. Por su volumen, ocupa el segundo lugar después de los formados en la cuenca Usumacinta-Grijalva. Sobre éste se encuentra el puente que tiene un claro de 203.00 m sin estructuras que interrumpan el cauce.

Puente Río Grijalva I
2001

EJE TRONCAL
Villahermosa-Mérida

AUTOPISTA
Villahermosa-Chetumal

UBICACIÓN
Villahermosa-Aeropuerto
Km 6+800

ESTADO
Tabasco

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 391 m

No. DE APOYOS: 14

No. DE CLAROS: 13

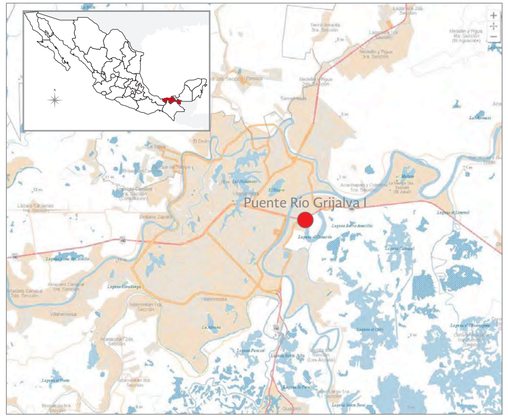
CLARO MÁXIMO: 116 m

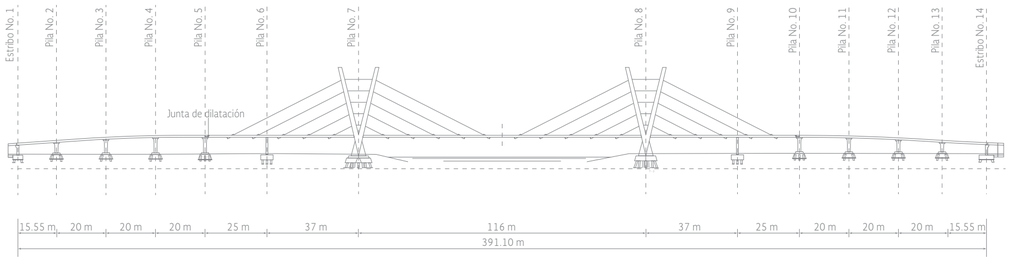
ALTURA MÁXIMA DE PILÓN: 35.72 m

No. DE TIRANTES: 4

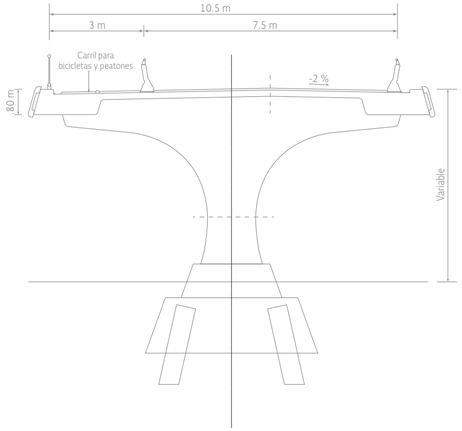
ANCHO TOTAL: 10.5 m

No. DE CARRILES: 2

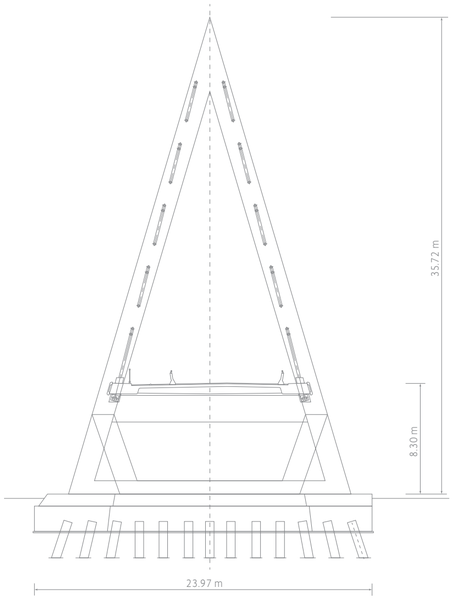


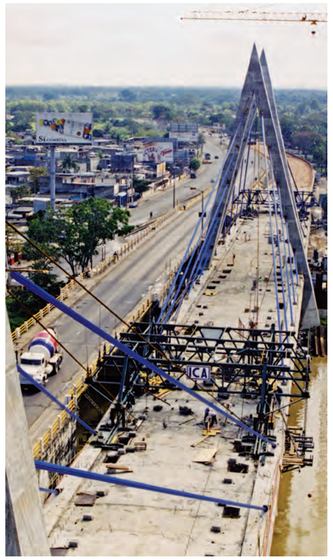


Vista frontal de pila



Vista frontal de torre





Izquierda: Debido a la condición inclinada de los pilones se utilizaron cimbras autotrepantes que agilizaran el colado de estos elementos, lo que permitió que los ajustes se adaptaran a la forma final y realizar el proceso de colado de manera sucesiva. ©FICA. En medio: Los tirantes utilizados en el puente Grijalva están capacitados para sobrepasar el rango de oscilaciones de tensión citado en las normas internacionales. ©FICA. Derecha: El tensado de los torones se realiza mediante gatos ligeros, ya sea unitarios, multitorón o de forma combinada reduciendo así el número de operaciones. ©FICA. Página 110: ©FICA.

Antecedentes y objetivos

La ciudad de Villahermosa, conocida como la puerta de entrada al sureste de México, es la capital del estado de Tabasco; está ubicada al centro del estado dentro de la delimitación de tres grandes ríos: Grijalva, Usumacinta y El Carrizal.

A finales del siglo pasado y a través de los gobiernos estatales y federales se concentró la atención en la modernización de las vías de comunicación terrestre que dotaran de mayor eficiencia las relaciones comerciales del estado. Es por esto que se generó el proyecto para la construcción de un nuevo puente que cruzara el río Grijalva y desfogara la carga vehicular con un incremento constante debido al potencial de desarrollo urbano, comercial e industrial de esa ciudad.

Situado en el km 6+800 de la carretera federal No. 180 Villahermosa-Chetumal, se inició la construcción en el año 1999, de la estructura conocida como puente Grijalva I, cuya función fue complementar al antiguo puente Grijalva, pues por ser la capital del estado, resulta ser el centro comercial, económico y político en el cual convergen de forma diaria miles de vehículos cuyo flujo resultaba lento y peligroso en el cruce del puente que tan sólo constaba de dos carriles, provocando embotellamientos y caos vehiculares a todas horas del día.

La ejecución de este proyecto puntualizó el interés en los aspectos técnicos y socioeconómicos que permitieran colocar a Villahermosa como una ciudad a la vanguardia en tecnología respecto de vías de comunicación terrestre al contar con la infraestructura de la talla de un puente atirantado, de los que se pueden encontrar contados ejemplares a lo largo de toda la República mexicana.

Estudios preliminares

Al momento de realizar las visitas físicas al lugar en donde se ubicaría el proyecto, y posterior a la revisión de los planos generales del puente existente, se determinó que una de las dificultades que debería enfrentar el proyecto del nuevo puente era la poca altura existente sobre la rasante del río, lo que obligaba a concentrar las soluciones sobre las características de la superestructura, lo cual motivó a pensar en distintas soluciones estructurales y estéticas que cumplieran con los objetivos, obteniendo como resultado tres distintos anteproyectos.

Anteproyectos

1. *Arco con tablero intermedio:* El funcionamiento estructural de este puente obligaba a tener que construir dos pilas con cimentaciones muy grandes y por lo tanto, costosas.
2. *Puente de velas:* Resultaba la solución menos armónica con el entorno y debido al puente antiguo, se planteaba la conveniencia de buscar una solución armónica y transparente al máximo, para no alterar el paisaje.
3. *Puente atirantado:* Fue la solución más adecuada por su armonía y transparencia y porque admite mejor su desdoblamiento.

Cimentación

Por encontrarse en una región con un alto índice de humedad y próximo a un cuerpo de agua, el suelo en la zona donde se llevó a cabo la construcción del puente es de baja calidad, con una escasa capacidad de sustentación.

Debido a esta cualidad principal, la cimentación se realizó con base en zapatas en forma piramidal que a su vez se encuentran sustentadas por medio de pilotes de acero con un diámetro de 76 cm cada uno y rellenos con concreto; éstos están contraventeados entre sí por medio de tubos —también de acero— con un diámetro de 22 centímetros.

Subestructura

Está conformada por nueve cuerpos de pilas de altura variable que se encargan de sostener los claros de 15.5 a 37 m de largo, situados a los extremos de los pilones.

Por su parte, al centro de la longitud total del puente y como estructuras límitantes al claro de 116 m se encuentran dos torres pilones integradas a la superestructura y que se encargan de contener el sistema de atirantamiento del puente.

Estos pilones se intersecan en diagonal en la parte inferior a la superestructura formando una V en sección longitudinal hasta alcanzar una altura total de 36 m. Mantienen una forma de V invertida si se miran de forma transversal; es decir, si se les observa de frente en cualquiera de los dos sentidos de circulación. Cada una de estas diagonales sostiene cinco tirantes que se encuentran anclados al tablero para su correcto funcionamiento estructural.

Superestructura

El puente Grijalva I tiene una longitud total de 391.1 m siendo el tramo entre los ejes 5 al 10 conformado por un claro central de 116 m más los dos claros de 37 m y dos de 25 m que constituyen el tramo atirantado para una longitud total de 240 m. Asimismo, cuenta con dos viaductos de 75 m cada uno y accesos construidos con muros de concreto reforzado para sostener terraplenes.

La estructura del tablero está basada en dovelas de concreto presforzadas al centro del puente, mientras que a los lados de éste, el tablero está constituido por losas de concreto hidráulico que se apoyan sobre trabes presforzadas, colocadas sobre cada uno de los ejes formando dos tramos de tablero de 75 m cada uno.

El tablero alberga dos carriles de circulación sumando un ancho de 7.5 m entre ambos, además de contener un carril para el tránsito de bicicletas y peatones de 3 m, por lo que el ancho total útil del tablero es de 10.5 m, con dos paramentos a los extremos del puente, más un paramento que separa los carriles para autos del carril peatonal y de ciclistas, lo que lo convierte en un puente casi único en su especie por tener consideraciones hacia este tipo de usuarios.

Por su gran extensión, al río Grijalva lo cruzan más de 15 puentes en zonas urbanas entre los que destacan Belisario Domínguez, Peñitas, de Alcalá, de Frontera Comalapa y, por supuesto, el Grijalva I.

Puente Arroyo Pinzandarán
2003

EJE TRONCAL
Manzanillo-Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecandureo

AUTOPISTA
Morelia-Lázaro Cárdenas

UBICACIÓN
Nueva Italia-Infiernillo
Km 136+767

ESTADO
Michoacán

TIPO DE PUENTE: Armadura metálica tipo lomo de camello

LONGITUD TOTAL: 308 m

No. DE APOYOS: 7

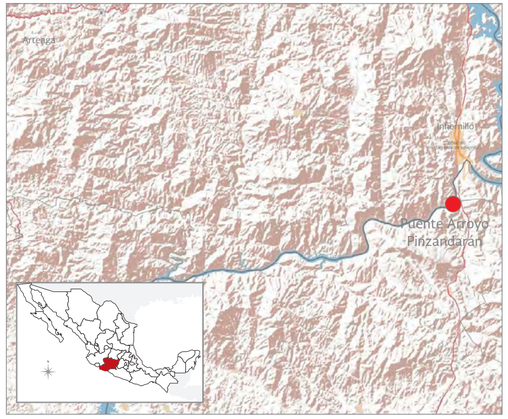
No. DE CLAROS: 6

CLARO MÁXIMO: 102 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 25.45 m

ANCHO TOTAL: 19.67 m

No. DE CARRILES: 4



El puente Arroyo Pinzandarán está ubicado en el municipio de Arteaga, Michoacán, en la carretera Morelia-Lázaro Cárdenas, específicamente en el tramo Nueva Italia-Infiernillo. Se encuentra a un costado del vaso de la presa Infiernillo, en el km 136+767. La construcción del puente se inició en enero de 2002 y se terminó el 30 de junio de 2004. En total tiene una longitud de 308 metros.

Antecedentes y objetivos

La ubicación del puente obligó a que algunos de los apoyos de la estructura quedaran situados en el vaso de almacenamiento de agua de la presa, situación que hizo necesario que parte de la cimentación tuviera que ejecutarse en época de estiaje para trabajar en seco, hasta donde fuera posible. Además, fue necesario llegar a una negociación con los habitantes para la ejecución del proyecto, ya que sus actividades pesqueras se verían afectadas durante la construcción.

Cimentación

Para la cimentación de la obra no fue necesaria la utilización de equipos o sistemas especiales; la excavación se realizó con retroexcavadoras. Por el tipo de material, en ocasiones fue necesario agregarles martillos hidráulicos. Todas las pilas se encuentran apoyadas sobre zapatas rectangulares de concreto armado cuyas secciones son de 11 x 20 m en su mayor dimensión, que es en la pila No. 1, y de 10 x 15 m en la pila No. 4.

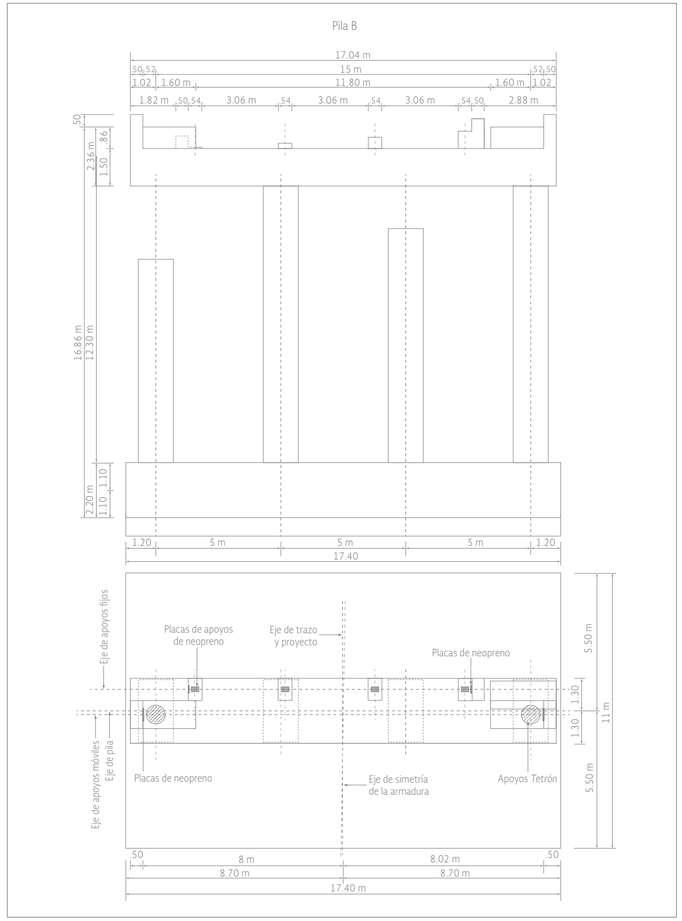
Subestructura

La subestructura está formada por dos estribos y cinco pilas de concreto reforzado con resistencia de 250 kg/cm². Tres de las pilas son de sección rectangular hueca con diferentes dimensiones. Dos tienen medidas de 2.2 x 9.0 m (pila A y pila No. 1), con espesor en paredes de 60 cm; la tercera (pila No. 2) es de 2.40 x 1.35 m con 70 cm de espesor en las paredes. Las otras dos pilas son columnas con zapatas rectangulares de sección maciza. La altura de las pilas varía de 13.00 a 25.45 m. La construcción de las columnas se realizó con cimbras trepadoras. Los elementos extremos de la subestructura son estribos de concreto reforzado con un cabezal que recibe al tablero; éste a su vez se apoya sobre las zapatas de cimentación.

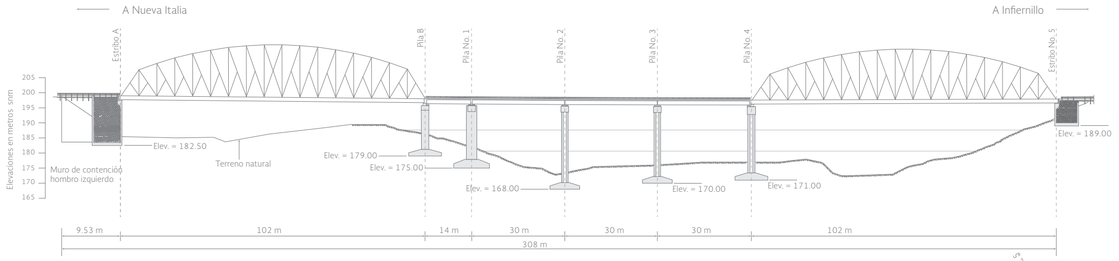
Las armaduras descansan en apoyos tipo *Tetron FX* de 73.4 x 10.0 cm de espesor y en apoyos tipo *Tetron G6* de 74.0 x 11.1 cm de espesor; en la parte de concreto se utilizaron neoprenos ASTM-D2240, dureza 60 (ft=100 kg/cm²).

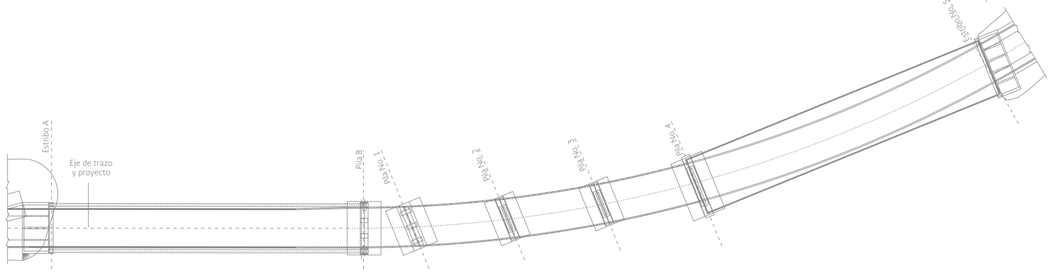
Superestructura

La superestructura está formada por seis claros: dos de ellos son de estructura metálica tipo paso a través,

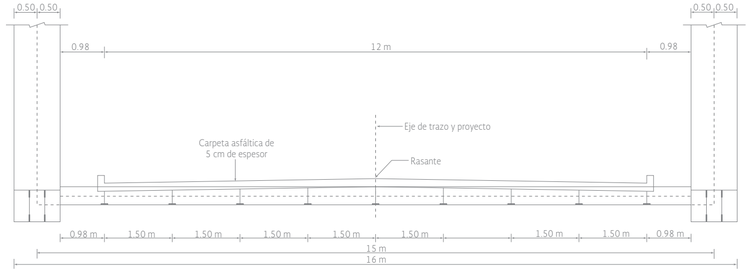


Enfrente: El puente Arroyo Pinzandarán, perteneciente a la carretera Morelia-Lázaro Cárdenas, se localiza en un tramo donde pasa a un costado del vaso de la presa Infiernillo. La topografía del lugar obligó a tener dos tramos de estructura metálica conocidos como paso a través, y tres tramos de trabes prefabricadas de concreto.

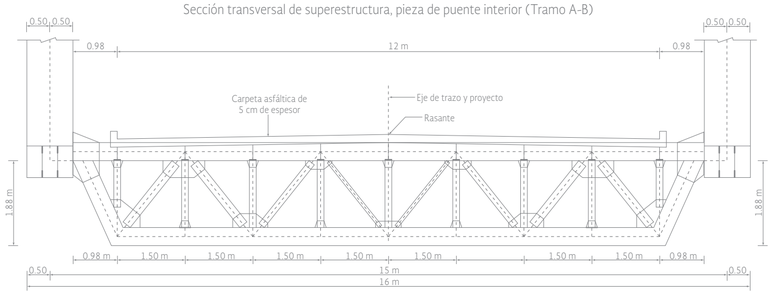




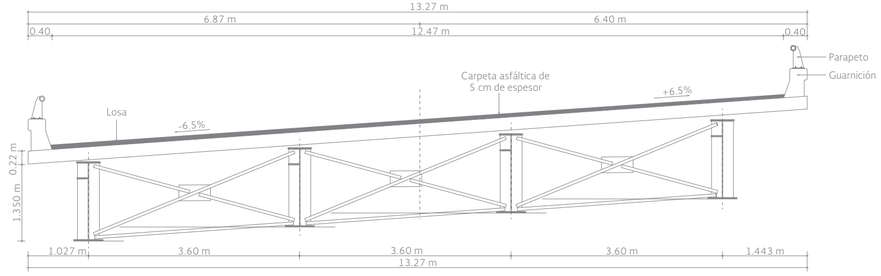
Sección transversal de superestructura, pieza de puente extrema (Tramo A-B)



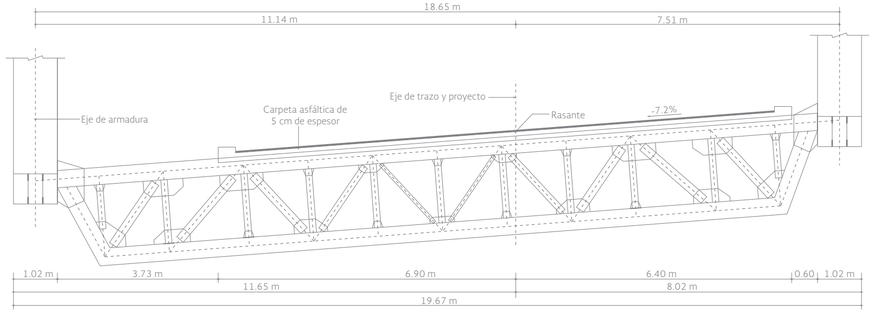
Sección transversal de superestructura, pieza de puente interior (Tramo A-B)

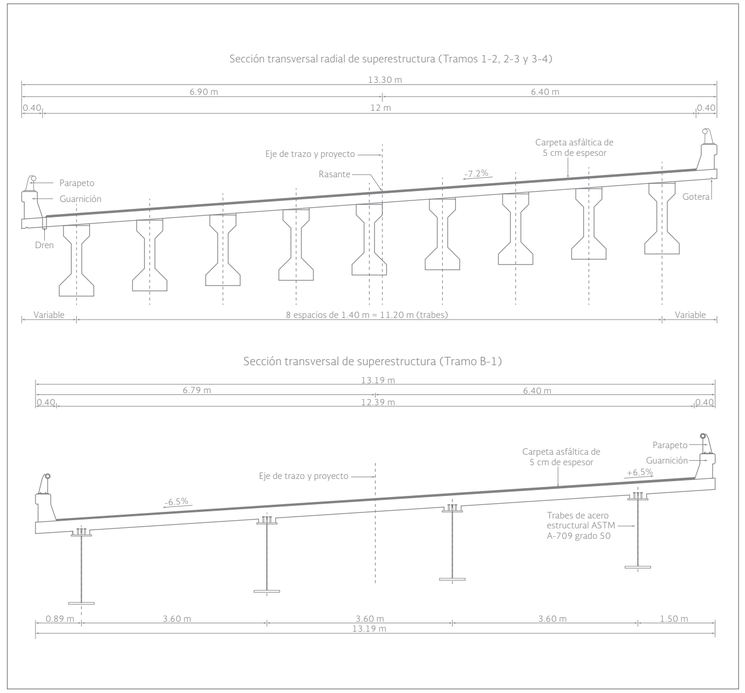


Sección transversal de superestructura por Est = 136 + 631.98



Sección transversal de superestructura, pieza de puente interior (Tramo 4-5)





Enfrente: Apoyos intermedios para la construcción del segundo tramo de armadura metálica con la grúa que suministraba el material. Estos tramos miden 102 m de largo, con una altura de 17 m, y un ancho de calzada de 12 m para dos carriles de circulación. Este puente forma parte de la Autopista Siglo XXI, junto a los puentes Infiernillo I e Infiernillo II.

de 102 m de longitud; se utiliza en el primer y último tramos de la obra; tres son tramos de trabes AASHTO tipo IV de concreto armado de 30 m y uno de 14 m de longitud. Las trabes de concreto de 30 m de largo fueron fabricadas y postensadas *in situ* debido a la dificultad de transporte por el camino existente. El montaje se realizó con grúas estructurales de 70 toneladas de capacidad, para lo cual fue necesario formar las plataformas de trabajo con material compactado para las maniobras necesarias.

El puente cuenta con un alineamiento horizontal mixto: recto y en curva. La pendiente transversal para la parte recta es de ±2% y en la parte curva es de 7.2% La sección transversal del puente cuenta con un ancho variable; en su parte más angosta mide 16 m y en su parte más ancha, 19.67 metros.

Armadura metálica

En su parte superior está constituida por montantes y diagonales ligados a las cuerdas superiores laterales. La altura máxima de estas cuerdas sobre el tablero es de 17 m. Para los claros de la estructura metálica, las secciones fueron habilitadas en taller y transportadas para su armado y montaje en el sitio. Cada una de las estructuras tiene un peso de 700 toneladas, por lo que su armado fue necesario realizarlo por secciones. Derivado del hecho de que algunos apoyos se encuentran dentro del agua, el montaje se llevó a cabo por la parte superior, colocando apoyos provisionales a cada 12 m de separación; la grúa de montaje se deslizó sobre la obra falsa provisional ya montada hasta concluir el claro completo.

Una vez que se tuvo la obra falsa completa en todo el claro, se procedió a iniciar el montaje de la estructura, iniciando por el apoyo lejano y colocando en su posición definitiva las secciones de la estructura metálica. Una vez terminada la soldadura de unión se realizaron las pruebas correspondientes.

Después de concluir el armado de la estructura definitiva se procedió al desmontaje de la obra falsa provisional. En el caso de la estructura metálica la cimbra que se usó fue lámina ROMSA. Para garantizar la unión entre la estructura metálica y la losa de concreto se emplearon pernos *Nelson*, soldados al patín superior de la estructura metálica.

Tablero metálico

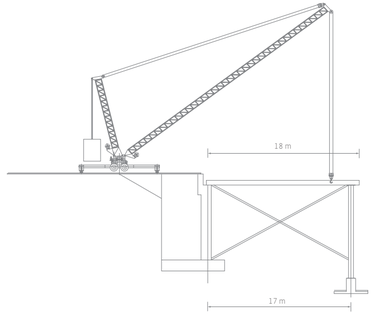
En la parte inferior de la armadura se tienen también dos cuerdas longitudinales extremas de sección hueca de 1.0 x 0.7 m de dimensiones. A cada 3 m se cuenta con armaduras transversales de 1.88 m de peralte, unidas mediante nueve trabes longitudinales de acero de peralte variable entre 30 y 40 cm, en sección "I".

La parte de concreto reforzado de la superestructura está formada por nueve trabes AASHTO tipo IV, postensadas y separadas cada 1.40 m. Este arreglo se utilizó en tres claros del puente de 30 m de longitud cada uno. Las trabes son de 1.35 m de peralte, 20 cm de alma, ancho del patín superior de 50 cm y ancho del inferior de 60 cm con una resistencia del concreto de 350 kg/cm^2. Sobre estas trabes AASHTO se apoyó una losa de 18 cm de espesor con una resistencia de 250 kg/cm^2, y sobre la losa se colocó una carpeta asfáltica de 5 cm de espesor.

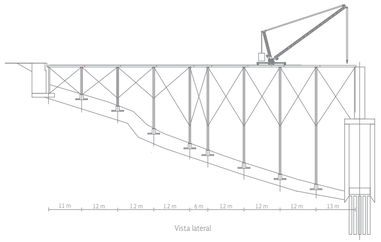
Esta parte del tablero se encuentra en el segmento curvo del alineamiento con un ancho total del tablero de 13.30 m y un ancho de calzada de 12 metros.

En el tramo de concreto existe también un tablero de 13.19 m formado por cuatro trabes "I" de acero estructural con un peralte de 1.35 m, separadas cada 3.60 m, y una losa de 22 cm de espesor con una resistencia del concreto de 250 kg/cm^2.

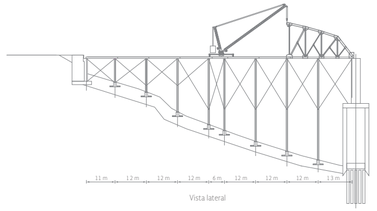
Paso No. 1
Se colocaron las cuerdas inferiores de la armadura apoyadas en columnas y el estribo; de inmediato, se armó el sistema de piso en el tramo de 18 metros.



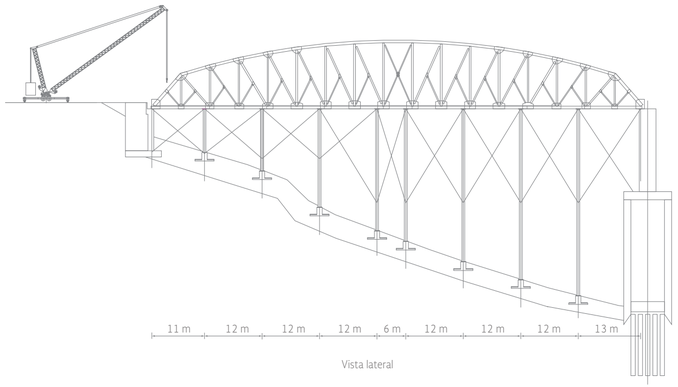
Paso No. 2
Continuó la colocación de columnas de apoyo al reforzarlas con venteos. Asimismo, se puso un sistema de piso y cuerdas inferiores de armadura.

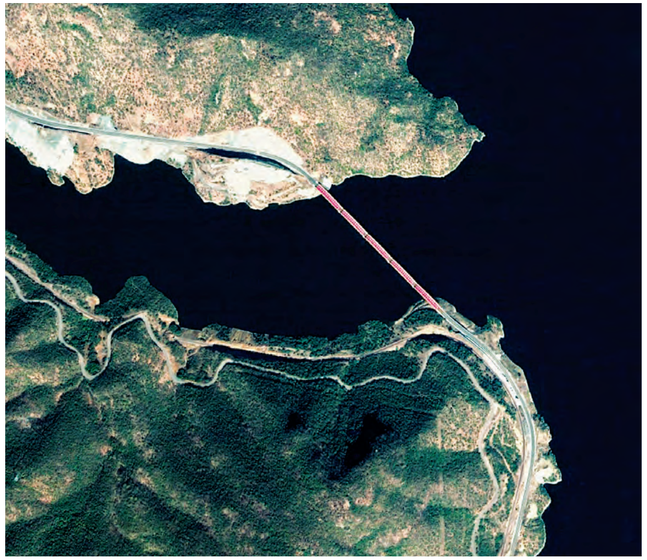


Paso No. 3
Realización del montaje de montantes diagonales, cuerdas superiores y sistema de techo de la armadura.



Paso No. 4
Una vez concluida la armadura metálica y colocada sobre el apoyo definitivo, se procedió a desmontar los apoyos intermedios provisionales.





Puente Infiernillo II
2003

EJE TRONCAL
Manzanillo-Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecandureo

AUTOPISTA
Morelia-Lázaro Cárdenas

UBICACIÓN
Infiernillo-Lázaro Cárdenas
Km 153+400

ESTADO
Michoacán

TIPO DE PUENTE: Armadura metálica tipo lomo de camello/Trabes

LONGITUD TOTAL: 525 m

No. DE APOYOS: 6

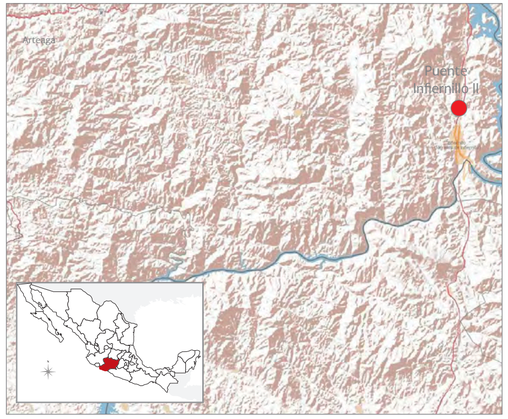
No. DE CLAROS: 5

CLARO MÁXIMO: 106 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 17 m

ANCHO TOTAL: 16.8 m

No. DE CARRILES: 2



El gobierno federal, a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, terminó de construir en el año de 2003 la carretera Morelia-Lázaro Cárdenas, en la cual se proyectaron varios puentes, entre ellos el Infiernillo I, ubicado en el km 251+500 del tramo Nueva Italia-Lázaro Cárdenas, y el Infiernillo II ubicado en el km 933+600.

El puente Infiernillo II de mayor longitud, cruza el río Balsas y forma parte de la Autopista Siglo xxi, específicamente en el tramo Nueva Italia-Infiernillo, ubicado en la comunidad de Huiduri, municipio de Arteaga, Michoacán. Forma parte del corredor carretero Manzanillo-Tampico, con ramal a Lázaro Cárdenas.

Antecedentes y objetivos

El trayecto de la autopista en el tramo Nueva Italia-Infiernillo exigía la realización de una gran bóveda, dos túneles y complicadas obras de estabilización de taludes en corte y terraplén, debido a la presencia de la vía del ferrocarril y de torres de líneas de energía eléctrica a la central hidroeléctrica de Infiernillo. Por ello se optó por modificar el trazo de la carretera y la construcción del puente Infiernillo II y así evitar la ejecución de las obras mencionadas con significativos ahorros de tiempo y recursos.

Este puente beneficia a los usuarios provenientes de la zona del Altiplano, de El Bajío y del norte del país, propiciando el intercambio comercial y turístico de la región y el flujo comercial, e impulsando el crecimiento y desarrollo del puerto de Lázaro Cárdenas a un menor costo de operación.

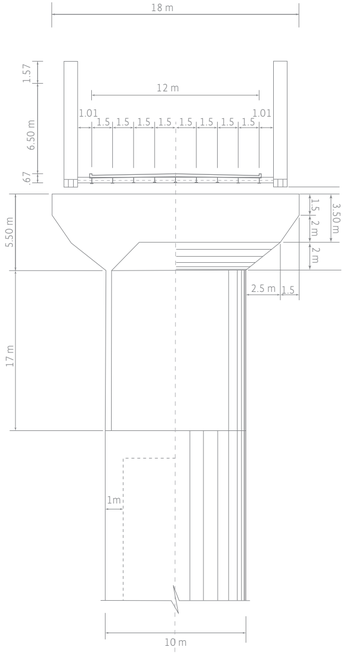
La construcción inició en mayo de 2000 y llegó a su fin en mayo de 2003. Debido a una falla en la pila No. 5 tuvo que cerrarse y se reabrió en 2005. El puente se localiza en una zona relativamente cercana a la fuente sísmica de subducción del Pacífico mexicano, aproximadamente a una distancia de 112 km de Lázaro Cárdenas.

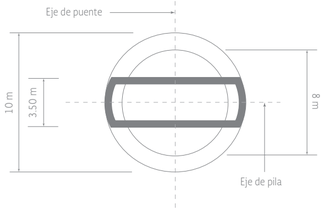
Estudios preliminares

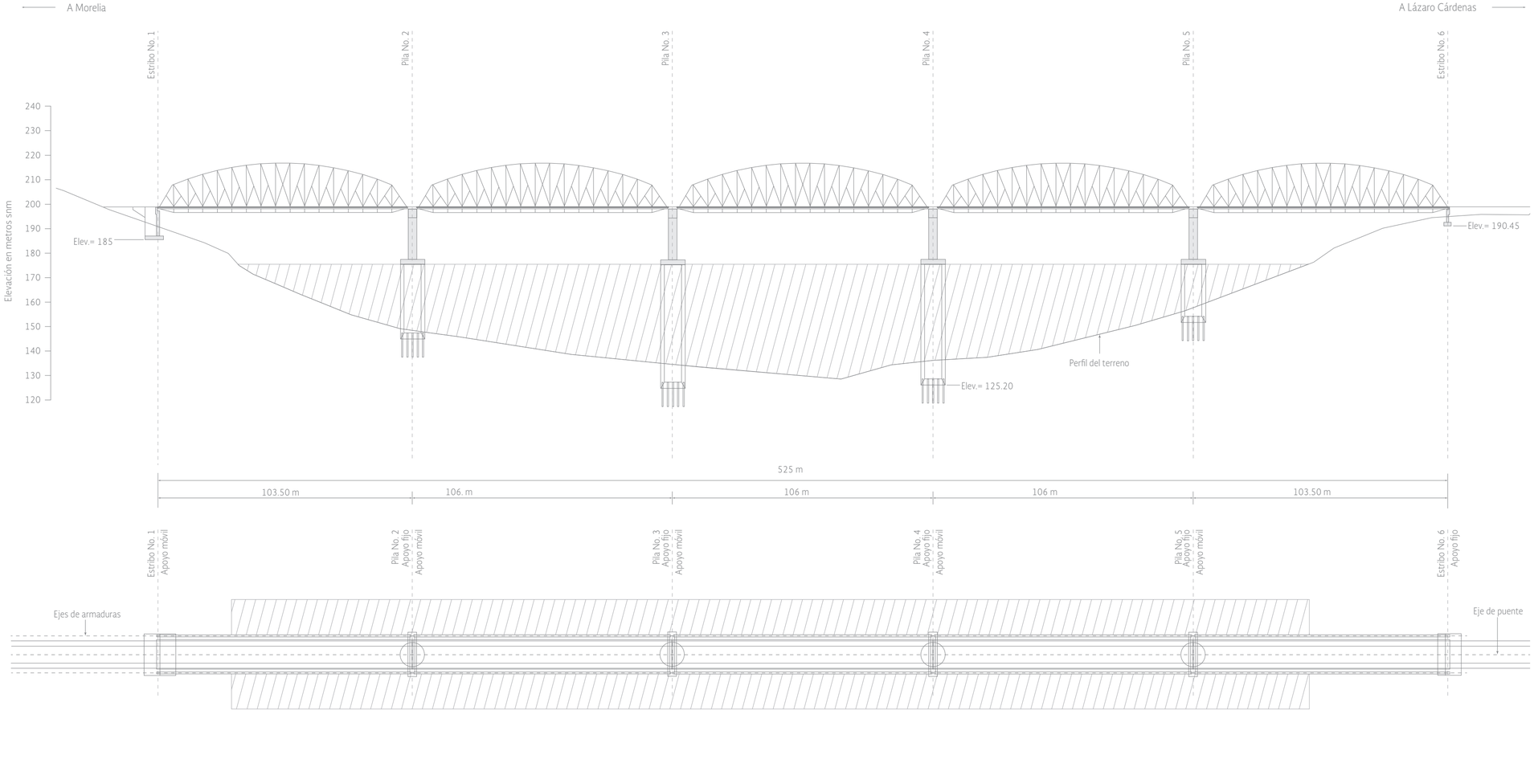
Las tareas constructivas no fueron sencillas ya que se debieron crear caminos para llegar a la zona y así iniciar el alzado de las obras clave, los puentes Infiernillo I y II. Como referencia, antes de las obras los lugareños caminaban por lo menos cuatro horas para desplazarse a

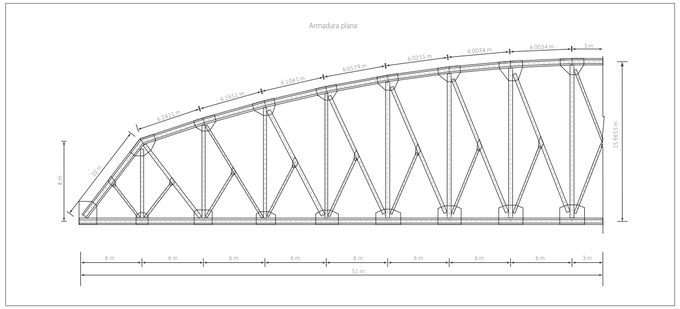
Derecha: En la actualidad, el puente Infiernillo II es el más largo del estado de Michoacán. La complejidad en su proceso constructivo –debido a su situación topográfica– hizo que fuera un reto para la ingeniería civil, desde el hincado de pilotes, hasta el transporte de materiales, construcción de pilas e izado de armaduras metálicas.

Pila y cilindro









Izquierda: El patio de fabricación de las estructuras metálicas se encontraba a 2 km de la construcción del puente. Para la colocación de éstas se tuvo que diseñar un sistema de transportación flotante especial para las armaduras, por su gran peso y volumen. **Derecha:** Una vez terminados los cilindros y cuando las pilas de concreto estaban en proceso de creación, se llevó a cabo la construcción *in situ* de los primeros dos tramos del puente; es decir, de las armaduras colocadas en los extremos, para las cuales se utilizaron apoyos intermedios, previo al apoyo final de la pila en la cual descansaría.

otra población, mientras que, por agua, tardaban alrededor de hora y media para llegar a su destino.

Proceso constructivo

En el caso del puente Infiernillo II, tres veces más pesado en su superestructura que el Infiernillo I, tuvo una gran complejidad en cuestiones de proceso constructivo, en parte por la difícil topografía del terreno; pero también por lo lejano del patio de armado, lo cual implicó la construcción especial de un transporte fluvial para trasladar las estructuras a 2 km de distancia, principalmente para las tres armaduras centrales, con un peso de 600 toneladas cada una, y para llevar a cabo su armado definitivo. Durante la construcción fue necesario flotar tres armaduras sobre el ramal de la presa. Para este efecto se diseñó un sistema de flotación, aprovechando la geometría de las armaduras, para llevarlas con toda seguridad hasta los apoyos en el agua.

Este sistema de desarrollo propio, fue una medida importante para evitar riesgos en el montaje del puente. Su gran longitud, que se eleva y atraviesa el vaso de la presa, es de 525 m, que lo convierte en el puente más largo de Michoacán.

Cimentación

La cimentación consta de dos tipos de cilindros huecos de concreto: en las pilas de menor longitud (pila No. 2 y pila No. 5) se usaron secciones de 8.5 m de diámetro, con pared de 1.0 m de espesor, cimentadas en 19 pilotes perimetrales y 13 centrales de 60 cm de diámetro, cada uno. Por su parte, en las pilas de mayor longitud (pila No. 3 y pila No. 4) se colocaron dos cilindros de 10 m de diámetro, con pared de 1.20 m de espesor, cimentados sobre 15 pilotes perimetrales y nueve centrales de 90 cm de diámetro individual. Los cilindros cuentan con tapas de concreto reforzado macizas: una tapa superior, en la que descansa la pila, de 2 m de espesor y una tapa inferior, que descansa sobre pilotes de 2.5 m de espesor.

En total, la cimentación profunda constó de 42 pilotes de 90 cm de diámetro y 64 pilotes de 60 cm de diámetro, colados *in situ* bajo tirantes de agua de 40 m de profundidad, para soportar los cilindros de concreto hidráulico de 8.5 m y 10 m de diámetro, respectivamente.

Subestructura

La subestructura tiene seis apoyos de concreto armado colados *in situ*. Está formada por dos estribos de sección variable en los extremos y cuatro pilas huecas de 8.50 x 3.5 x 15 m, con paredes de 60 y 40 cm de espesor en el lado largo y en el corto, respectivamente. La pilas se rematan en la parte superior con un cabezal de concreto reforzado macizo de tipo cabeza de martillo con patines de 6.5 x 3.0 m y alma de 3.5 x 12 m y 5.5 m de alto. Las dimensiones de los topes sísmicos en los cabezales son de 0.90 x 0.70 x 3.5 metros.

La resistencia del concreto reforzado usada en losa, cabezales, pilas y cilindros fue de 250 kg/cm^2.

Superestructura

El puente tiene una longitud total de 525 m, con un ancho de calzada de 12 m y cinco tramos de armadura metálica tipo paso a través, formados por arcos y sistemas de piso de acero estructural. Los tres tramos centrales son de 106 m de longitud y los tramos extremos de 103.50 m, con un gálibo de 6.50 m, con contraventeo superior y sistema de piso con estructura metálica con piezas puente cada 6 metros.

Cuenta con una losa de rodamiento de concreto reforzado con espesor de 0.18 metros.

La propuesta original de las armaduras sufrió una pequeña modificación al agregarse dos perfiles metálicos rectangulares tipo placa, que modificaron marginalmente las propiedades dinámicas de la estructura.

Las vigas principales de la armadura superior tienen un patín de 65 cm, en las cuales están apoyados verticalmente a cada 6 m los perfiles que forman la estructura metálica. Estas vigas secundarias tienen un patín de 30.48 cm y longitud variable. Todos los elementos que forman la armadura son de acero estructural A36.

Sobre las pilas de concreto se colocaron tirantes para el izaje de las armaduras, construidos a un kilómetro de la posición final de las pilas dividiendo este proceso en un total de tres etapas. Durante la primera se realizó el transporte de una de las armaduras hasta una plataforma de carga, punto en el que se colocó sobre un pontón para lograr moverla a través de la represa y poder empujarla sobre dos rieles colocados a los bordes de éste y por medio de cuatro rodillos de 200 toneladas y dos grúas de 75 toneladas.

En la segunda etapa, el tirante colocado sobre la plataforma se hizo descender hasta los pontones que flotaban a nivel del agua; esto gracias a cuatro grúas de 330 toneladas. Una vez que la estructura se colocó sobre el pontón fue movida de la plataforma de carga hasta la posición de las pilas.

Por último, el tirante fue levantado hasta su posición final, logrando pasar la estructura a través de las pilas sin interferencia gracias a que las partes finales de las armaduras aún no habían sido construidas; una vez levantadas, se soldaron al resto de la estructura y se colocaron en su posición final. El peso de cada elemento es de 600 toneladas. Se levantaron a una altura promedio de 19 metros.

Izquierda: Construcción de columnas rectangulares de concreto armado sobre la cimentación cilíndrica. **Derecha:** El izado de las tres armaduras centrales de la superestructura fue logrado con gatos hidráulicos los cuales levantaban con cables las estructuras. El izado de las armaduras fue individual.

Puente Chiapas
2003

EJE TRONCAL
México-Chetumal

AUTOPISTA
Las Choapas-Ocozocoautla

UBICACIÓN
Raudales de Malpaso-Ocozocoautla
Km 961+731

ESTADO
Chiapas

TIPO DE PUENTE: Empujado / Lanzado de trabes

LONGITUD TOTAL: 1208 m

No. DE APOYOS: 9

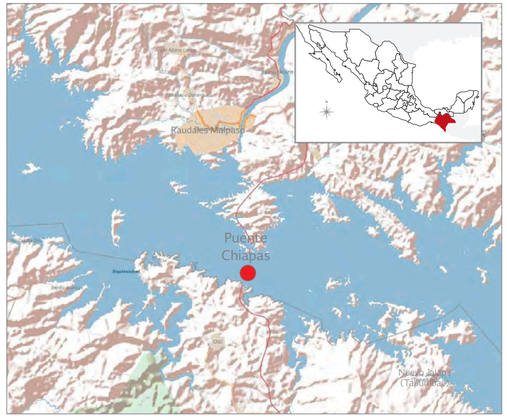
No. DE CLAROS: 8

CLARO MÁXIMO: 168 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 89 m

ANCHO TOTAL: 10 m

No. DE CARRILES: 2



Antecedentes y objetivos

El gobierno federal, a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, realizó en el año de 1994 la construcción de la carretera Las Choapas-Ocozocoautla como parte de las acciones encaminadas a integrar el estado de Chiapas al desarrollo social y económico del país. Con una longitud de 198 km, esta vía forma parte del circuito transísmico, cuya operación logró comunicar Chiapas con el estado de Veracruz, la capital de la República Mexicana y el centro del país, reduciendo los tiempos de recorrido y los costos de operación.

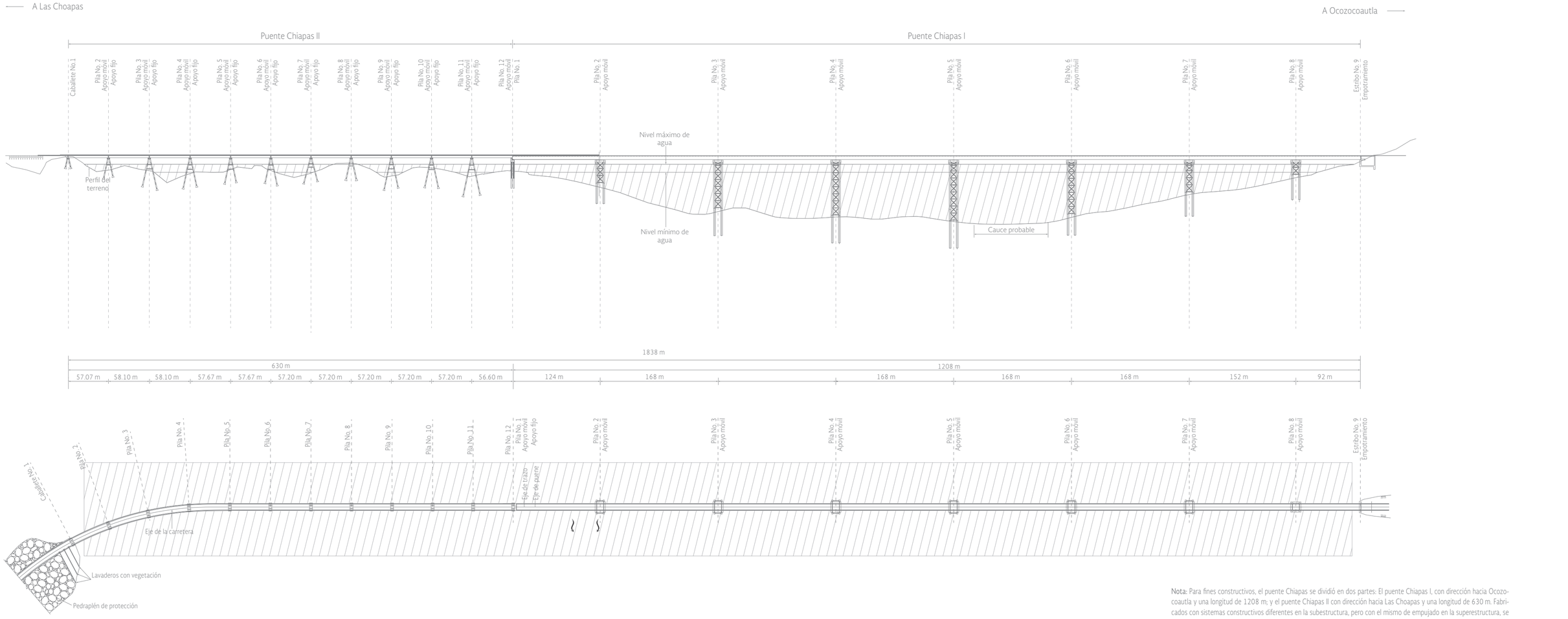
En el tramo Raudales de Malpaso-Ocozocoautla, ubicado en el km 961+731, se requería cruzar el embalse de la presa Nezahualcóyotl, por lo que fue necesario realizar el proyecto del puente Chiapas. Además, el estado de Chiapas está localizado en una de las zonas sísmicas más activas de México. La región donde se localiza el puente se ve afectada por diversos fenómenos meteorológicos, lo que hizo del puente un proyecto de gran desafío. Previo al diseño del puente, la SCT realizó complejos estudios topográficos de alta especialización.

A finales del año de 2002, el Instituto de Ingeniería de la UNAM fue elegido como el principal consultor para la construcción, empujado de la superestructura del puente; verificación del control de calidad durante la fabricación de las dovelas o segmentos; al proponer, seguimiento o monitoreo del empujado y cuando fuera el caso, refuerzos o elementos adicionales que permitieren aumentar el factor de seguridad de la superestructura durante las diferentes etapas de empujado.

El proyecto

Es una estructura predominantemente de acero, considerada de tipo especial dadas las dimensiones que posee. Cuenta con siete pilas centrales, un estribo y un caballete. Las pilas principales están formadas por estructuras tubulares tipo plataformas marinas denominadas *jackets*, construidas con tirantes de agua del orden de 80 m y compuestas por cuatro tubos principales de 2.77 m de diámetro, unidos entre sí por contraventeos a base de tubos de acero de 48" y 30" de diámetro. Cinco de los *jackets* miden 10x18 m y dos son de 10x10 m; su altura varía entre 20.50 m

Entre las opciones analizadas para la construcción del puente Chiapas se encontraban las de un puente atirantado, flotante o acostillado; sin embargo, ninguna de éstas reunía las condiciones necesarias requeridas por la SCT en cuanto a tiempo, costo y funcionalidad. Finalmente se optó por un puente empujado, lo que hace viable una ampliación de dos a cuatro carriles si así lo demanda el tránsito vehicular, facultad que no hubiese sido posible conseguir, por ejemplo, con un puente atirantado.



Nota: Para fines constructivos, el puente Chiapas se dividió en dos partes: El puente Chiapas I, con dirección hacia Ocozocoautla y una longitud de 1208 m; y el puente Chiapas II con dirección hacia Las Choapas y una longitud de 630 m. Fabricados con sistemas constructivos diferentes en la subestructura, pero con el mismo de empujado en la superestructura, se consideran actualmente como un sólo puente que suma un tramo total de 1838 m. Este texto descriptivo hace referencia únicamente a la primera sección, por haber sido el que tuvo mayor importancia por toda la ingeniería aplicada, cantidad de materiales e innovaciones que implicó su construcción.

Izquierda: Para colocar el *jacket* en el lugar donde quedó cimentado, fue necesario botarlo al agua y transportarlo al sitio. Para lograrlo, se implantó un sistema de flotación consistente en cuatro tubos adicionales (flotadores), colocados en los extremos del *jacket*, sellados con tapas reforzadas. Tenían diafragmas internos que controlaban la flotabilidad de la estructura y válvulas que permitieron la inundación controlada de una parte del *jacket*, para hacer que girara la pieza hasta dejarla en posición vertical. ©IFICA. **Derecha:** El botado del *jacket* consistió en depositarlo en el agua una vez colocado el sistema de flotación, para ser transportado en forma horizontal. Durante su transporte, el *jacket* fue jalado por uno o dos remolcadores de entre 600 y 300 hp, a una velocidad de remolque de un nudo para llegar al sitio en un lapso de entre cuatro y cinco horas donde se iba a girar verticalmente. Las condiciones meteorológicas para poder transportar estos elementos debían ser las mejores, dada la complejidad de la labor. Una vez transportado al sitio, se procedió a inundar dos de los cuatro tubos flotadores abriendo las válvulas de inundación colocadas en la parte inferior de éstos. La zona centro del *jacket* que no se inundaba permitía mantenerlo a flote; si el *jacket* requería elevar su nivel respecto del nivel del embalse de la presa, se le inyectaba aire, mientras que para descender su nivel se permitía la entrada de agua. Esto fue de gran utilidad durante la transferencia de carga sobre los pilotes provisionales. ©IFICA.

y 85.70 m. Están desplantados sobre cuatro pilas de concreto cada uno, mismas que alcanzan profundidades de hasta 50 m por debajo del fondo del embalse. Cada uno lleva un cabezal de concreto armado.

Los *jackets* se fabricaron en un patio localizado a 6.5 km del puente. En este lugar, los *jackets* se botaron al vaso de la presa y se transportaron hasta el sitio de construcción, donde se posicionaron según lo indicado en el proyecto. Cada uno es similar a la subestructura de una plataforma petrolera como las existentes en el golfo de México. Las maniobras de botado, transporte y posicionamiento de los *jackets* fueron el resultado de estudios especializados y tecnología aplicados a plataformas marinas.

Cimentación

La cimentación profunda de cada apoyo está formada por cuatro pilotes de concreto reforzado de 2.50 m de diámetro, colados en el lugar con longitudes efectivas variables de 39 a 66 m y profundidad de desplante máxima de 135 metros.

A partir del proyecto de cimentación de esta obra, se utilizó una técnica novedosa mediante el método de circulación inversa; el único apropiado para perforar en tales condiciones. Este procedimiento consiste en inyectar aire comprimido hacia el interior de una tubería que acciona una herramienta cortadora dentro de una perforación llena de agua o lodo bentonítico. El aire inyectado inmediatamente arriba de la broca provoca una disminución drástica en la densidad del fluido atrapado dentro de la tubería de perforación, trayendo consigo un flujo ascendente el cual genera la succión del material de recorte a través de una ventana existente en la broca.

El procedimiento se inicia con la instalación de un ademe metálico, tanto permanente como recuperable. Se colocan en la parte inferior dientes de acero con incrustaciones de tungsteno para facilitar su hincado en los depósitos del suelo y asegurar un empotre en la roca subyacente. En la parte superior se une a los ademes recuperables por medio de juntas atornillables.

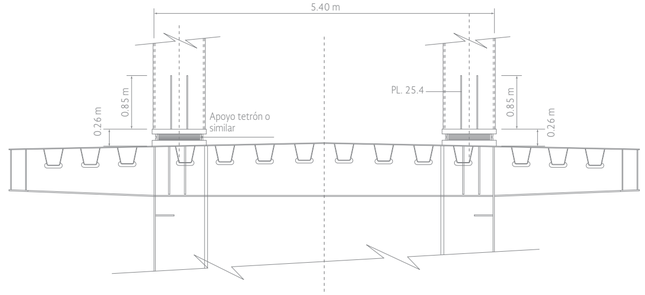
Posteriormente, se coloca la perforadora sobre la parte superior del ademe recuperable, se le instalan todos los accesorios y una vez establecido el flujo de agua se inicia la perforación. Ya empotrado el ademe un metro en la roca, se establece la operación de perforación hasta alcanzar la profundidad de proyecto. Realizada la perforación, se introdujo el acero de refuerzo que previamente fue habilitado en los patios. Al finalizar la etapa del acero de refuerzo, se inició la colocación del concreto hidráulico, actividad que requirió una planeación cuidadosa; allí se resolvieron el diseño de concreto y su elaboración, el transporte dentro del vaso de la presa y su colocación.

Concluidas las etapas de cimentación y colocado de los *jackets*, se procedió a la instalación de las extensiones de los tubos principales y de la obra falsa para el colado de los cabezales, la cual se realizó en dos etapas manejando un promedio de 640 m³ de concreto.

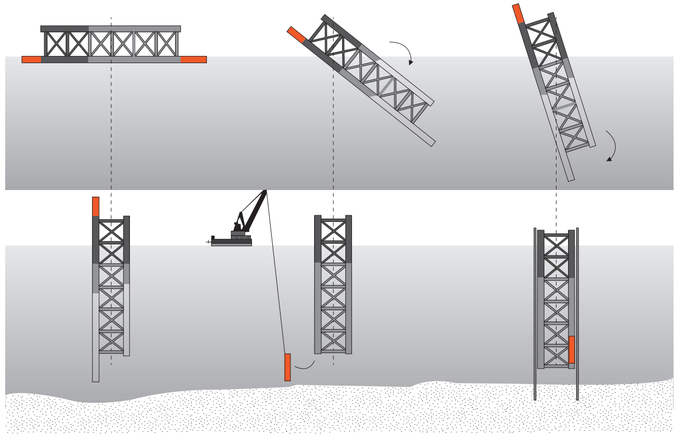
Subestructura

Dos apoyos extremos de concreto reforzado y siete pilas de acero tipo *jacket* con cabezales de concreto reforzado forman la subestructura. Los *jackets* están

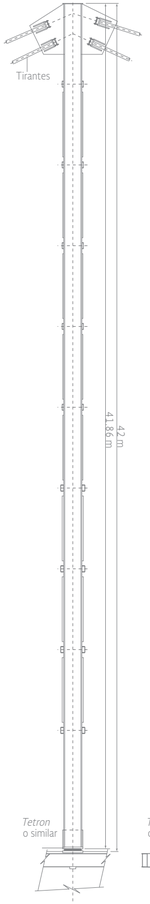
Detalle inferior de mástil



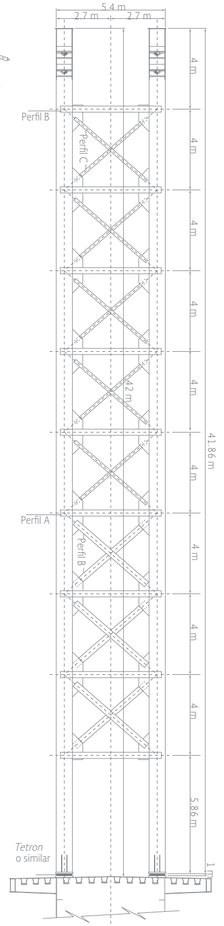
Posicionamiento vertical de un *jacket*



Vista A



Elevación



Realizado cerca del eje del puente. Se pone en funcionamiento el sistema de inmersión para que de manera controlada permitiese el paso del agua a través de una válvula de 4" de diámetro. El tiempo de la maniobra de giro varió para las distintas pilas pero sólo con duración de unos minutos.

formados por cuatro tubos principales rolados en planta y transportados a la obra; se unen entre sí por medio de soldadura hasta alcanzar la longitud de proyecto. Para armar cada uno de ellos, se colocaron los tubos menores y contraventeos formando dos marcos acostados sobre el terreno de la plataforma, mismos que se izaron verticalmente por medio de grúas colocando los contraventeos de proyecto para formar la estructura completa del *jacket*. Posteriormente se pusieron en su lugar los sistemas de flotación, con lo que se garantizaba la flotabilidad del elemento para su transporte y maniobras de fijación.

Para colocar los *jackets* en su posición definitiva se utilizó el método de inundación controlada que se lleva a cabo mediante un sistema de accesorios previamente fijados en los mismos, tales como diafragmas y *grippers* que permiten de una manera controlada la inundación del elemento para, con base en esto, se pueda girar y colocar en su lugar definitivo.

Una vez que el *jacket* estuvo en su posición final, se hincaron dos pilotes provisionales de acero de 90 cm de diámetro hasta el fondo del embalse.

Superestructura

La base de la superestructura fue hecha totalmente en acero, tiene una longitud de 1 208 m y fue diseñada para construirse por el sistema de empujado. Cuenta con el claro más largo (168 m) entre elementos verticales —*jackets*— del tipo plataformas marinas.

La superestructura está formada por 102 dovelas metálicas, en su mayoría de 12 m de longitud, fabricadas en acero estructural A-572 grado 50 con forma tipo cajón ortotrópico con ancho total de 10 m en su patín superior, de 6 m en el patín inferior y una altura de 5.5 m. Se utilizó la técnica de empuje, con la cual se deslizó la superestructura sobre apoyos provisionales hasta cubrir la longitud total del puente a partir del estribo número 9 o margen sur de la presa. Una vez colocada la superestructura en su posición definitiva, se procedió al cambio de los apoyos provisionales por los definitivos.

Es importante destacar que para el habilitado y armado de las dovelas se realizó un estricto control geométrico que garantizó el cumplimiento del proyecto en cuanto a tolerancias dimensionales; la calidad fue verificada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que realizó una inspección visual al cien por ciento de los procesos de soldadura, así como pruebas no destructivas con técnicas de ultrasonido, radiografías y otros métodos como líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

Procedimiento de empujado

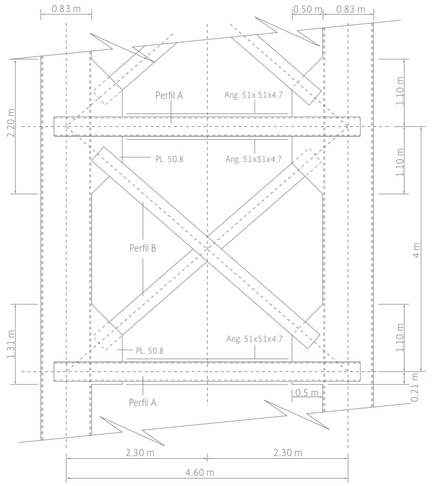
El puente fue diseñado por el sistema de empuje, que consiste en lanzar la estructura metálica a partir del estribo número 9. Esta actividad se realizó a un nivel de 25 cm por arriba de su posición definitiva. La estructura estuvo equipada con una nariz de lanzamiento de 44 m de longitud y un mástil provisional con una altura de 42 m, además de cuatro pares de tirantes. El peso total de la estructura a lanzar resultó de 9393 toneladas. Una vez terminado el empujado, se cambiaron los apoyos provisionales por los definitivos y se bajó a su posición de proyecto.

Características generales del proyecto

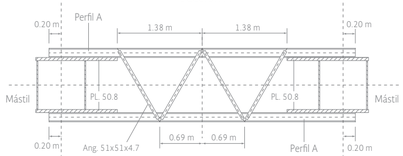
El cajón de la superestructura tiene 5.4 m de ancho en el patín inferior, 10 m de ancho en el patín superior y 5.5 m de peralte. Los espesores de las placas que las forman también son variables, desde 8 mm hasta 100 mm de espesor. Cada dovela está formada por 10

Izquierda: Nariz de lanzamiento con atirantamiento provisional. En relación con la longitud del voladizo, la nariz utilizada en el puente Chiapas fue la de mayor dimensión en el mundo, a la fecha de su construcción. **Derecha arriba:** Pila tipo *jacket* o plataforma *template* de 10x18 m usada en los apoyos de los ejes 4 al 7 lo cual representa, por mucho, el de mayor número de plataformas instaladas hasta la fecha en la construcción de un puente en México. **Derecha abajo:** Nariz de lanzamiento arribando al cabezal de pila tipo *jacket*. Debido a la dificultad que representaba la construcción de pilas y la cimentación dentro de grandes magnitudes de agua, se consideraron soluciones llevadas a cabo en la construcción de plataformas petroleras marinas, de las que ya se tenía prueba fehaciente de sus excelentes resultados.

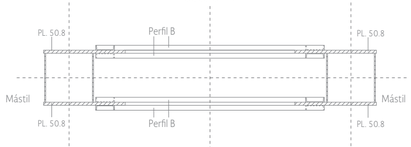
Contraventeos A y B



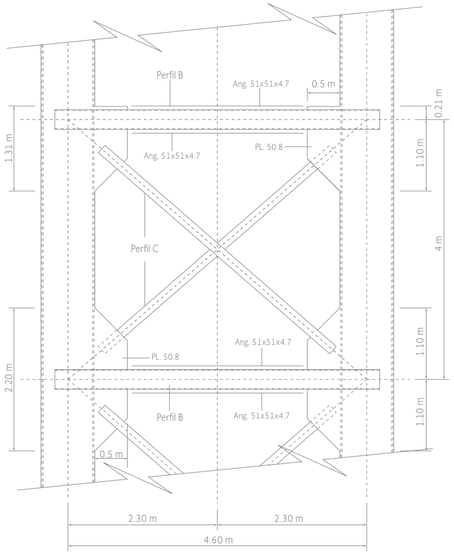
Sección A



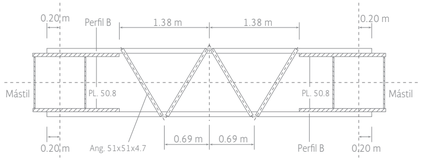
Sección B



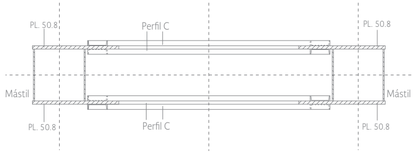
Contraventeos B y C



Sección B



Sección C



Izquierda: La nariz de empuje es una estructura auxiliar fabricada en acero A-36. Está constituida por dos vigas de sección "I" variable, con una longitud de 44.06 m, ligadas a través de venteos de ángulo, separados éstos cada 4 m. La función primordial de la nariz de lanzamiento es la de guiar el empuje de la superestructura en forma lineal hasta alcanzar cada uno de los apoyos definitivos del puente. **Derecha:** Los tubos principales son empatados hasta adquirir la longitud requerida por cada uno de los *jackets* y son reforzados con anillos rigidizadores, contraventeos tubulares, verticales y horizontales, así como con placas para la conexión entre los tubos. Todas estas piezas son soldadas y sometidas a diferentes pruebas no destructivas, donde son aplicados códigos internacionales que aseguran la correcta aplicación de soldadura y armado de cada estructura.

piezas, las cuales se fabricaron en planta y se transportaron a la obra, donde se terminaron de ensamblar dentro de un cajón de empujado.

Construcción de la superestructura de acero

Por limitaciones de espacio en el ancho de la carretera de acceso al sitio de construcción del puente se decidió que las dovelas se fabricaran en dos módulos denominados "U": una "U" inferior y una "U" superior, los que después se transportaron desde el taller hasta el sitio del cruce. Para ensamblar las dos "U", se construyó en el sitio del cruce un "cajón" o patio de empujado de 320 m de longitud, el cual se utilizó como patio de ensamble o área de montaje de las dovelas. Este cajón estuvo formado por una estructura de concreto reforzado de 6 m de profundidad por debajo del nivel de rasante y 10 m de ancho. Para el montaje de las "U" y de las dovelas completas se requirió de un gran número de trabajadores calificados laborando simultáneamente, además del apoyo de grúas y equipo especializado para mover las piezas por soldar. En diferentes etapas de la construcción estuvieron trabajando en la obra cerca de 800 personas, incluyendo ingenieros, técnicos y personal de campo.

Control de calidad

Por lo que respecta a la soldadura, una vez aplicada ésta se revisaba su calidad mediante técnicas de ultrasonido, partículas magnéticas y radiografía. Cabe mencionar que tan sólo en las uniones longitudinales de placa se aplicaron 12.7 km de soldadura. En las uniones de continuidad de dovela con dovela se usaron 2.7 km de soldadura y en las uniones de los pisos o patines superior e inferior de las dovelas con los bulbos o atiesadores longitudinales, se requirieron otros 78.5 kilómetros.

Las actividades de verificación se realizaban de acuerdo con el tipo de unión soldada y según su importancia desde el punto de vista estructural. El objetivo era detectar en las soldaduras defectos tales como porosidades, falta de fusión, penetración excesiva, aparición de escoria, fisuras superficiales, etc., que pudieran ocasionar una disminución de la resistencia de la soldadura y en consecuencia poner en riesgo la seguridad del puente. Además, de acuerdo con los códigos de construcción (AASHTO y AWS), todas las soldaduras fueron inspeccionadas visualmente por personal calificado para tales fines.

Empujado de la superestructura

Una vez ensamblado en un lado de la presa un tramo de varios segmentos de dovelas, éste se empujaba progresivamente, en varias etapas, hacia el otro lado del vaso. Esto implicó que la subestructura se debió construir previamente. En el caso del puente Chiapas, el principal reto consistió en hacer llegar la superestructura a través de ocho claros, teniendo algunos voladizos de hasta 168 m, que era la mayor dimensión utilizada en el mundo hasta el momento de su construcción. Por otra parte, el empujado del claro de 92 m, el de menor longitud del puente, ya representaba un récord para las longitudes de empujado, realizadas en México.

Por las dimensiones mencionadas, para el empujado, la superestructura del puente Chiapas fue equipada con dos elementos de acero provisionales: una nariz de lanzamiento y un mástil con cuatro pares de tirantes, además de apoyos especiales provisionales en el estribo y *jackets*, así como un dispositivo especial que se colocó en la punta de la nariz de lanzamiento. El peso total de la estructura a empujar fue de 8900 toneladas, con un promedio de 8 toneladas por metro.

El sistema de empuje constaba de mordazas, gatos hidráulicos y un chasis o estructura de empuje. Las mordazas se montaron sobre las vigas de concreto (dos en cada una) y por medio de la acción de gatos hidráulicos se fijaron a estas vigas. En el sentido longitudinal del empujado, las mordazas están unidas entre sí también por gatos hidráulicos, los que al ser accionados empujan la estructura. Para ello, cada una de las mor-

La superestructura tiene una longitud de 1 208 m y está constituida por 102 dovelas que forman un cajón de acero ortotrópico de 5.50 m de peralte constante. En su placa superior se colocó una capa de rodamiento de 5 cm de espesor. El peso total de la superestructura es de 8 900 toneladas. Quedó dividida en ocho claros.

Para permitir el cruce de la presa, la primera sección del puente Chiapas I se une con el puente Chiapas II, que se conformó por 11 pilas constituidas por ocho pilotes metálicos inclinados de 1.20 cm de diámetro, colados por el interior con concreto hidráulico, sobre las pilas se construyeron cabezales de concreto reforzado y una superestructura formada por trabes de acero estructural A-709 grado 50 reforzadas entre sí con contraventeos horizontales y verticales. La pila 1-12 o apoyo común con el puente Chiapas II, es un caballete construido a base de concreto reforzado f'c = 250 kg/cm². El tipo de cimentación es desplantada mediante nueve pilotes de concreto —7 de 1.5 m y dos de 2 m de diámetro—, todos fueron colados *in situ*. ©FICA.

dazas delanteras tiene su chasis de empuje conectado con la superestructura en la última dovela de la fase de empujado.

Al accionar el gato hidráulico se inducía el empuje: la superestructura avanzaba sobre unos rodillos en el cajón de empujado, sobre los gatos deslizantes en el estribo 9 y sobre los apoyos deslizantes en cada uno de los *jackets*.

Una fase del empujado constó de los siguientes pasos: se libera la fuerza que mantiene fija la mordaza de retención o mordaza delantera; se acciona el gato hidráulico y la superestructura se desliza 50 cm hasta terminar la carrera del gato; se aprieta la mordaza que se movió y se libera la fuerza de la mordaza trasera; se cierra el gato de empuje. Se repite otro ciclo cuantas veces sea necesario.

Instrumentación y seguimiento

Para el seguimiento o monitoreo de la superestructura durante el empujado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM diseñó un sistema específico de instrumentación. Para revisar los esfuerzos y las deformaciones que se generaron durante el empujado se instrumentaron cuatro dovelas con deformímetros eléctricos o *strain gages*. Además de éstos, se utilizaron anemómetros, los que se colocaron en la nariz y en la parte más alta del mástil para conocer la velocidad del viento.

También se utilizó un arreglo móvil de dos acelerómetros para registrar las vibraciones verticales que se producían en los voladizos en las diferentes etapas del empujado. Las historias de aceleraciones registradas con los acelerómetros se procesaban en el sitio y se derivaban frecuencias naturales de vibración con el fin de hacer un diagnóstico global de la estructura en voladizo y comparar los valores de estas frecuencias con los obtenidos mediante el modelo matemático.

Los termómetros se utilizaron para llevar un registro de la variación de las temperaturas a lo largo del peralte de las dovelas, así como de la temperatura ambiente.

Para medir los alargamientos de los tirantes del mástil provisional, se colocaron dos DCDT o medidores de desplazamiento. Con base en las elongaciones registradas se calculaban las fuerzas de tensión en los tirantes y en consecuencia también se podía calcular la reacción del mástil sobre la superestructura.

También durante el empujado, con ayuda de equipo topográfico de alta resolución, se registró la magnitud de los desplazamientos verticales en la punta de la nariz de lanzamiento y en algunos otros puntos a lo largo de la superestructura.

Modelo matemático

El diseño original de la superestructura se basó en el análisis de modelos de vigas tridimensionales. Dada la poca versatilidad de estos modelos para incluir defectos surgidos durante el ensamble de las dovelas, en el Instituto de Ingeniería se preparó un modelo tridimensional de elementos finitos para la verificación del diseño original y de las magnitudes de los esfuerzos durante las diferentes etapas de empujado.

Lo anterior se hizo de forma tal que todos los elementos de cada dovela (alma, patines, diafragmas, bulbos, etc.), mástil y nariz de empuje se representaran lo más cercano posible a la realidad.

En la elaboración del modelo matemático y en los análisis participaron varios estudiantes de licenciatura y de posgrado, quienes fueron los encargados de aplicarlo. El trabajo de estos universitarios fue supervisado por investigadores del Instituto de Ingeniería, de la misma forma que se hace en otro tipo de proyectos.

Comentarios finales

El empujado de la superestructura se terminó el 2 de diciembre de 2003, cuando la punta de la nariz de lanzamiento apoyó sobre el caballete No. 1. El puente fue inaugurado el 22 de diciembre de ese año. Para la ejecución del proyecto se requirieron más de 22 000 toneladas de acero y la utilización de recursos humanos y materiales de diferentes regiones del país, lo que propició una derrama económica en beneficio de la población local. Además, los beneficios que aporta esta nueva infraestructura representan un ahorro anual de 600 millones de pesos y la reducción de 20% de los gastos de operación para el transporte de los productos primarios que genera Chiapas.

La construcción del puente Chiapas por parte de la SCT, sin precedente para obras similares en México, representó un importante avance en el uso de materiales y sistemas constructivos a utilizar en el futuro. Con el puente Chiapas se lograron avances trascendentales en la ingeniería de puentes de México.

En el diseño de las pilas y del cajón se ha considerado la ampliación de la carretera a cuatro carriles de circulación cuando el tránsito lo requiera. Esto podrá llevarse a cabo por medio de la colocación de puntales metálicos en los costados, apoyados en el patín inferior para soportar una ampliación de 3 m de cada lado del patín superior, para tener un ancho de calzada total de 16.00 metros.

Puente Neverías
2004

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
Durango-El Salto
Km 33+288

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 320 m

No. DE APOYOS: 4

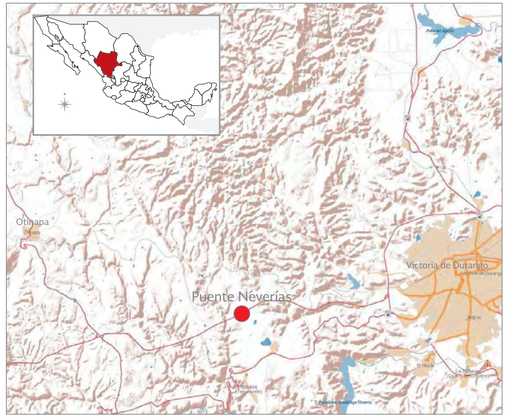
No. DE CLAROS: 3

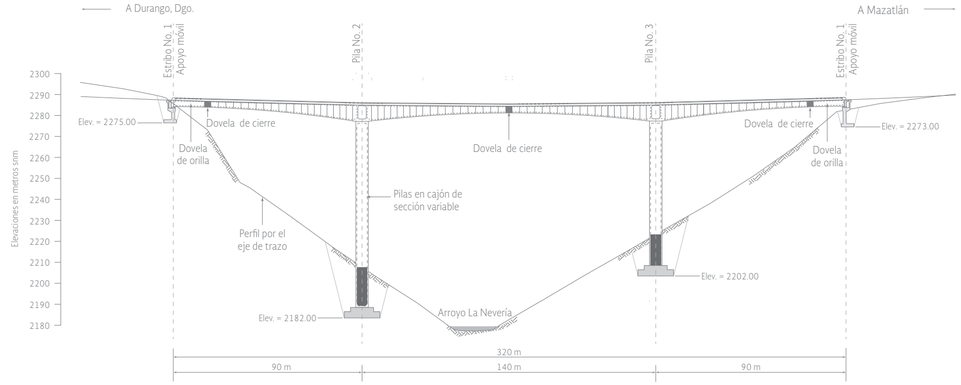
CLARO MÁXIMO: 140 m

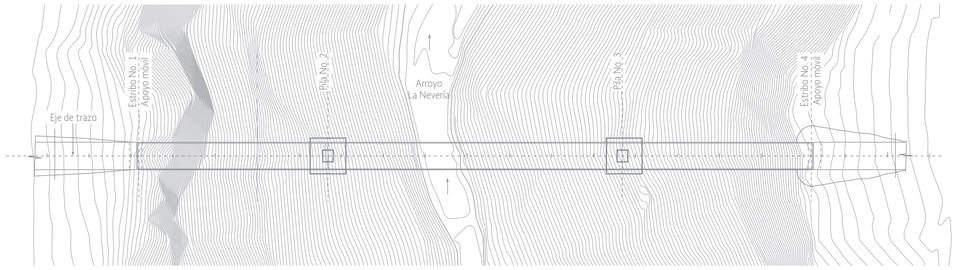
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 88.40 m

ANCHO TOTAL: 16.66 m

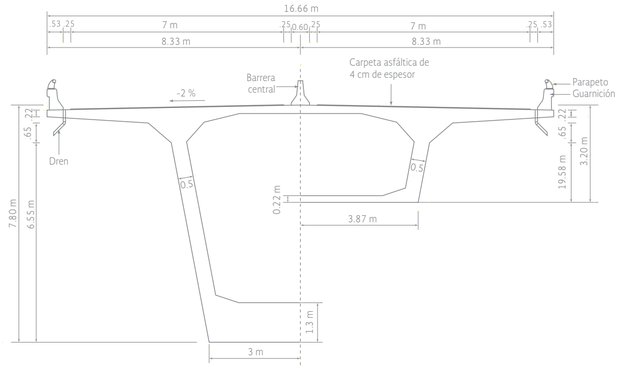
No. DE CARRILES: 4

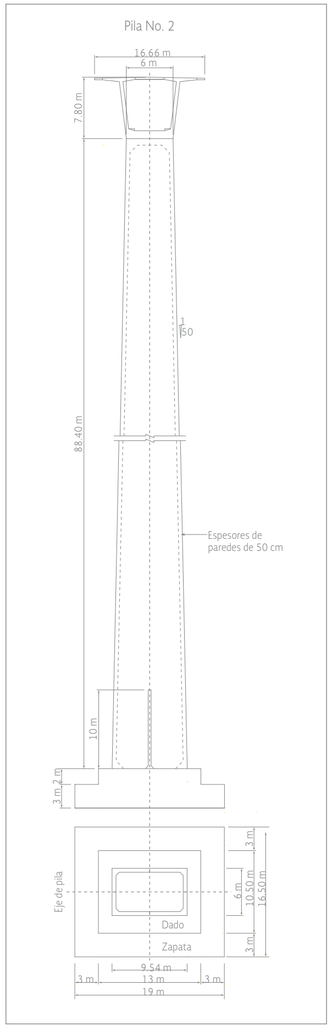






Sección transversal





Antecedentes y objetivos

El puente sobre el arroyo La Nevería se encuentra localizado cerca del poblado de Otinapa, correspondiente al municipio de Durango, dentro del mismo estado.

Forma parte de una de las estructuras que componen la autopista Durango-Mazatlán, se ubica en el tramo entre Durango y El Salto en el km 33+288.

Construido entre junio de 2003 y septiembre de 2004, este puente cruza una barranca con una profundidad mayor a 100 m, debiendo salvar a su vez un claro horizontal de más de 300 m. Fue el primero en la entidad en poseer tales características constructivas, y con el sistema constructivo de doble voladizo, lo que obligó a utilizar dos torres grúa instaladas para la construcción. Esto le dio categoría de puente especial, además de ser uno con los que se iniciaba una serie de puentes similares dentro de la magna obra de la autopista Durango-Mazatlán.

Cimentación

Está conformada por zapatas de concreto reforzado cuya resistencia es de 250 kg/cm² y con dimensiones de 19.00x16.50 m con una altura total de 3.00 m, punto en el que se reduce progresivamente la zapata para conformar un dado con medidas de 13.00x10.50 hasta alcanzar los 2.00 m de altura donde reciben las pilas que soportan a la superestructura.

En los puntos donde se desplantan estos elementos se encontró una resistencia del terreno con capacidad máxima de 90 t/m², mientras que en las laderas donde se construyeron los estribos, la resistencia de éste alcanza hasta 110 t/m².

Subestructura

Consiste en dos pilas centrales con forma rectangular hueca que varía conforme se incrementa la altura, pues mientras en la sección de arranque poseen dimensiones iguales a 9.54x6.00 m, éstas se modifican hacia los 6.00x6.00 m en el lecho bajo del tablero, manteniendo un espesor de pared uniforme de 50 cm a lo largo de 88.40 m de altura en el eje 2, y de 68.5 m en el eje 3. Hacia los extremos del puente se encuentran sendos estribos que reciben el tablero. En cada uno de éstos se encuentran colocados dos apoyos tipo *Tetron Shore-50* que funcionan para recibir el último segmento de dovelas. Adicionalmente se colocaron dos apoyos *Shore-60* con neopreno de 2 cm de espesor en los topes sísmicos para soportar esfuerzos de hasta 650 toneladas.

Superestructura

La superestructura la conforman tres claros: el central con 140 m de longitud y dos laterales de 90 m cada uno, con un desarrollo total de 320 m. Está construida por medio de 85 dovelas de sección hueca tipo cajón, con longitudes que varían entre los 3.05 m y los 3.60 m y alturas desde 3.20 m hasta 7.80 m. El ancho total es de 16.66 m distribuido en dos tramos de 7.00 m para alojar dos carriles cada uno, separados por un paramento de 60 cm al centro de éstos, además de dos colocados en los extremos laterales de 78 cm de altura cada uno.

Las dovelas se fabricaron con concreto postensado; coladas en sitio con una resistencia de 350 kg/cm², utilizando presfuerzo transversal en el patín superior de las mismas, protegido totalmente por medio de ductos de plástico.

Las dovelas colocadas sobre las pilas cuentan con diafragmas de concreto reforzado con 350 kg/cm² de resistencia que permiten realizar la conexión entre la pila y la dovela correspondiente.

Enfrente arriba: Este puente, ubicado en plena sierra de Durango, fue constituido por un total de 85 dovelas de sección hueca tipo cajón, construidas con concreto postensado coladas *in situ*, con una resistencia de 350 kg/cm². Las dovelas sobre pila tienen diafragmas de concreto reforzado para poder realizar la conexión entre la pila y la dovela. **Enfrente abajo:** La cimentación consiste en zapatas de concreto reforzado de 19 x 16.5 m con 3 m de altura, así como un dado que recibe a las pilas que soportan la superestructura. Las pilas son de sección hueca rectangular variable, con un espesor de pared constante de 50 cm. **Abajo:** Los tres claros, que suman un total de 320 m, fueron construidos con dovelas que varían en longitud y altura. El ancho de calzada de 15.10 m fue dividido en dos sentidos de 7 m cada uno. Los dos carriles por sentido, separados por un paramento al centro, aportan al usuario seguridad y rapidez.

Puente Barranca Begoña
2005

EJE TRONCAL
Manzanillo-Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo

AUTOPISTA
Morelia-Lázaro Cárdenas

UBICACIÓN
Nueva Italia-Infiernillo
Km 55+283

ESTADO
Michoacán

TIPO DE PUENTE: Empujado

LONGITUD TOTAL: 208.8 m

No. DE APOYOS: 5

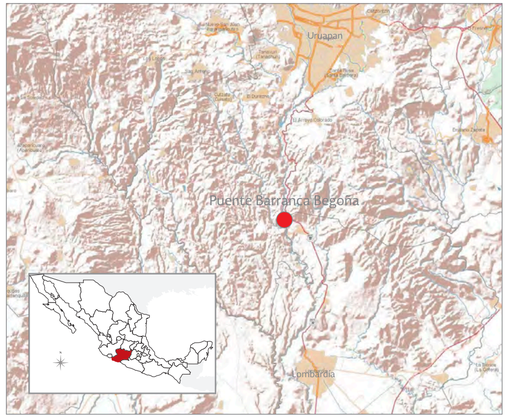
No. DE CLAROS: 4

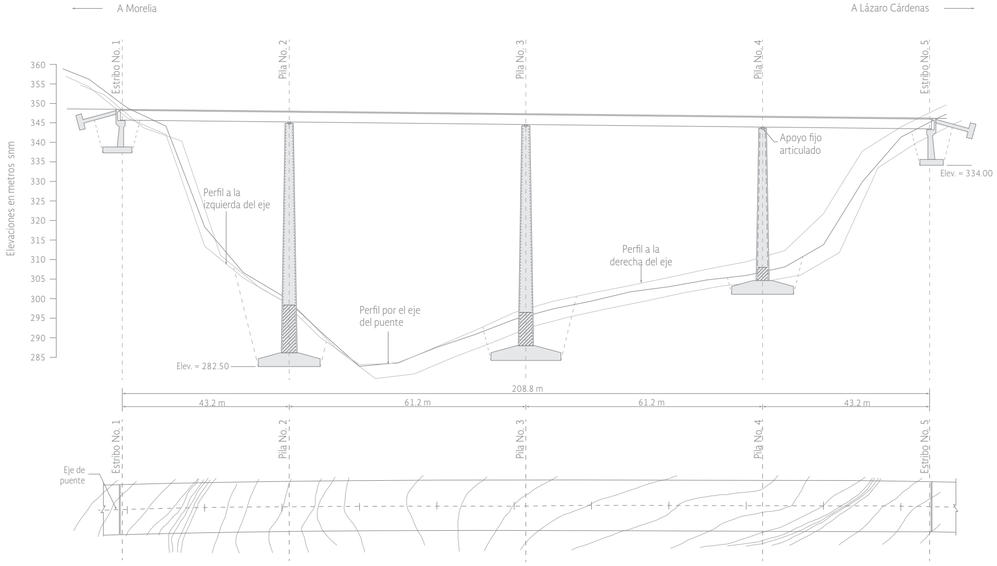
CLARO MÁXIMO: 61.20 m

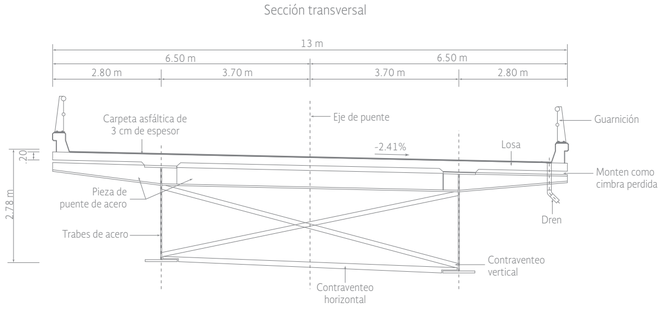
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 56.50 m

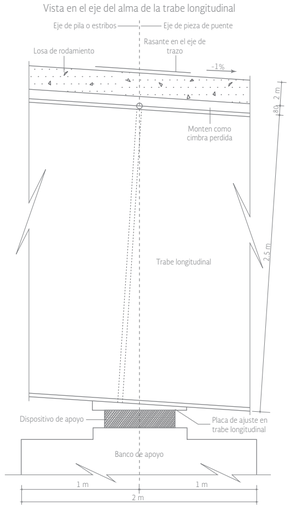
ANCHO TOTAL: 13 m

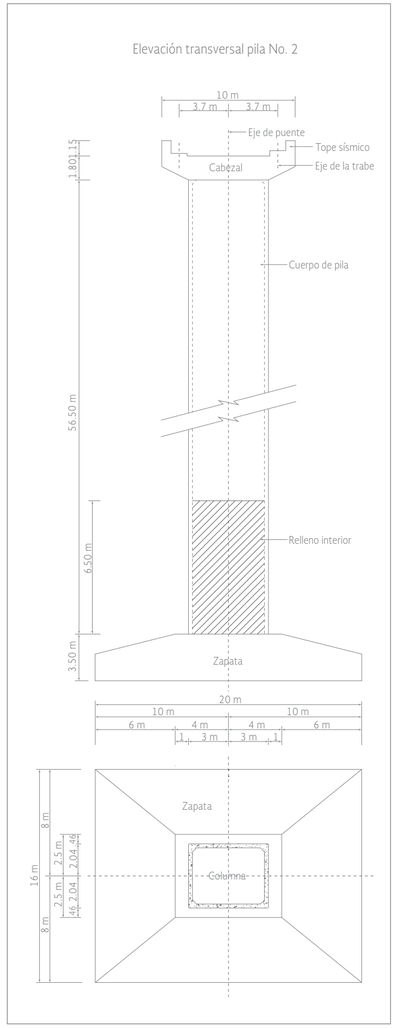
No. DE CARRILES: 2











Antecedentes y objetivos

Los estados de Michoacán y Guanajuato han mantenido distintos tipos de relaciones desde tiempo atrás, lo que ha hecho indispensable realizar un programa de inversión en infraestructura que impulse el desarrollo económico entre ellos, junto al desarrollo del país al vincular el puerto de Lázaro Cárdenas, el más dinámico del sistema portuario nacional, con el resto de América del Norte.

Este tramo carretero permite que esta región se consolide como punto estratégico en la logística de la República mexicana, pues con un radio de tan sólo tres horas de recorrido, tiene un alcance con cobertura de alrededor de 40% del mercado nacional.

Ubicado sobre el km 55+283 de la autopista Morelia-Lázaro Cárdenas, en el tramo comprendido entre Uruapan y Nueva Italia, se encuentra el puente que cruza la barranca Begoña. Se trata de una superestructura continua con un pequeño alineamiento horizontal en curva que salva una profundidad de barranca de 65 m y una longitud total de 208.8 metros.

Esto provocó que se modificara de fondo el sistema de transporte de la región, ahorrando a los automovi-

listas cerca de 1 hora con 10 minutos en el nuevo trayecto entre la ciudad de Morelia y la costa de Lázaro Cárdenas; apoyando a 4 700 usuarios a transitar diariamente y generando más de 4 100 empleos directos y 20 000 empleos indirectos con la construcción de esta obra.

Este proyecto impulsa también el potencial turístico de la zona al conectar sitios como los lagos de Yuriria y Cuitzeo, así como la zona del Copán.

Cimentación

De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos, se encontró que el terreno tenía una capacidad de carga admisible alrededor de las 60 t/m².

Debido a esto, la cimentación de los estribos en los extremos se encuentra auxiliada cada una por dos zapatas coladas contra roca sana, con penetración mínima de 1 m que hacen labor de refuerzo cuando se presentan los empujes longitudinales. Las dimensiones de éstas resultan de 4 x 4 x 1.50 m de altura giradas 15° con respecto de la horizontal del terreno, y se ajustan con precisión a las condiciones topográficas del sitio. Las zapatas que reciben los estribos tienen dimensiones de 5 x 13 x 1 m de altura, mientras las dos restantes, que reciben a las tres pilas que soportan el tablero de la superestructura, mantienen dimensiones entre 16 x 20 x 3.50 m y 18 x 21 x 3.75 m, todas ellas construidas en concreto reforzado con resistencia de 250 kg/cm².

Subestructura

Las secciones de las pilas sobre las que se sostiene la superestructura son de forma rectangular hueca, cuyas dimensiones de arranque oscilan entre 3.36 x 6.00 m y 4.08 x 6.00 m y se mantiene un espesor de pared constante de 30 cm en estos elementos.

Estas secciones se van reduciendo como si fuera una pirámide hasta alcanzar dimensiones de cierre de 2.00 x 6.00 m. En este punto se convierten en los cabezales sobre los que descansa la superestructura; éstos con una longitud de 10 m para abrazar al tablero, con 2 m de ancho y 2.95 m de peralte. El mayor de estos elementos (pila) se eleva hasta una altura de 56.50 m sobre el perfil del terreno.

Superestructura

La superestructura está formada por cuatro claros de losas de concreto reforzado sobre trabes de acero estructural A-50. Los claros intermedios tienen una longitud de 61.20 m cada uno y de 43.2 m los claros extremos, dando lugar a una longitud total de 208.8 metros.

A lo largo de la superestructura se colocaron elementos como un contraventeo horizontal y uno ver-

tical, ambos en cruz, así como una pieza puente montada en la parte superior de las trabes.

Sobre las trabes se cuenta con una losa de concreto reforzado de 20 cm de espesor, con una resistencia de 300 kg/cm². Pernos de tipo *Nelson* ligan la losa con los patines de las trabes y piezas puente; sobre la losa se extiende una carpeta asfáltica de 3 cm de espesor con una pendiente en su sección transversal de -2.0% El ancho total del tablero es de 13 m. Cuenta en sus extremos con guarnición y parapeto, dejando un ancho libre de calzada de 12 m con una pendiente longitudinal de uno por cierto.

Enfrente: Las tres pilas que funcionan como apoyos principales tienen una sección rectangular. Fueron apoyadas sobre zapatas que, al igual que las pilas, tienen una sección rectangular. Una vez concluidas las pilas y los cabezales, inició la etapa de lanzado de trabes. **Arriba:** Cuando se concluyó la etapa de colado de pilas se colocó la estructura de la viga lanzadora sobre uno de los linderos del terreno para así posicionar las trabes longitudinales tipo "I" que absorberían el peso del tablero para transmitirlo a cada uno de los apoyos correspondientes. **Izquierda:** Las trabes que conforman la superestructura se colocaron mediante un sistema de empujado, para lo cual se emplearon gatos hidráulicos con los que se logró la fuerza de empuje, necesaria para desplazar las trabes que en conjunto forman la superestructura.

Puente Texcapa
2005

EJE TRONCAL
Acapulco-Tuxpan

AUTOPISTA
México-Tuxpan

UBICACIÓN
Tejocotal-Nuevo Necaxa
Km 141+340

ESTADO
Puebla

TIPO DE PUENTE: Acostillado

LONGITUD TOTAL: 365 m

No. DE APOYOS: 4

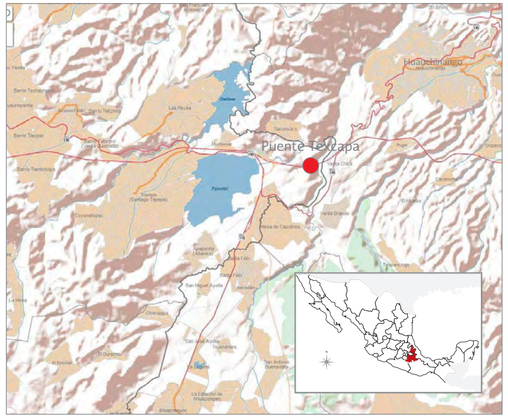
No. DE CLAROS: 3

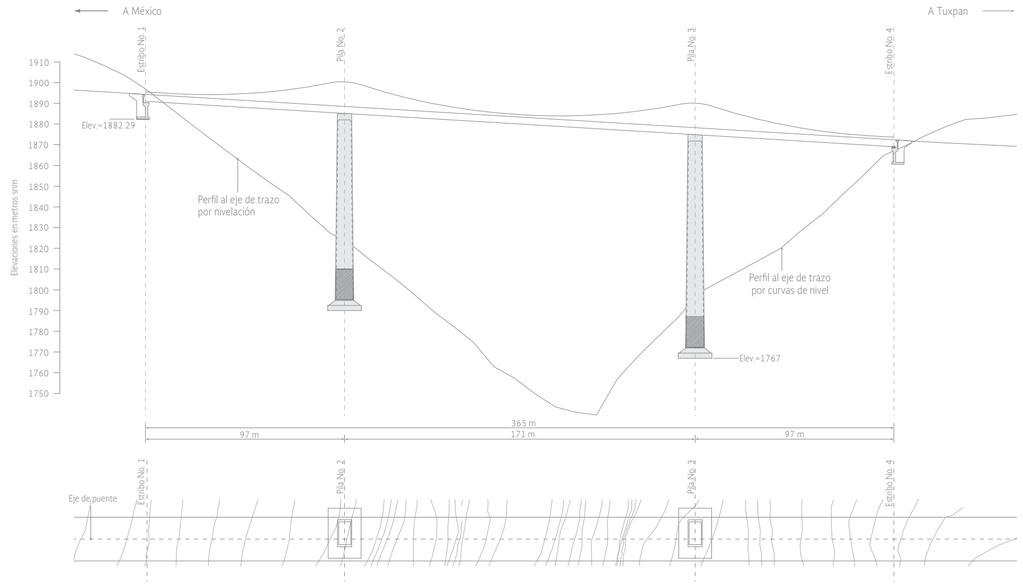
CLARO MÁXIMO: 171 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 107.77 m

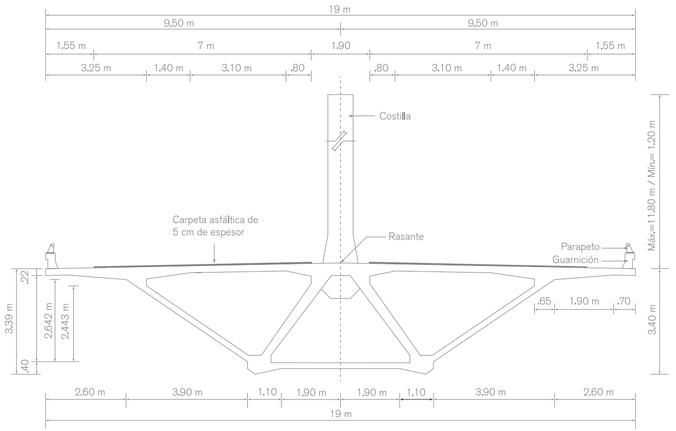
ANCHO TOTAL: 19 m

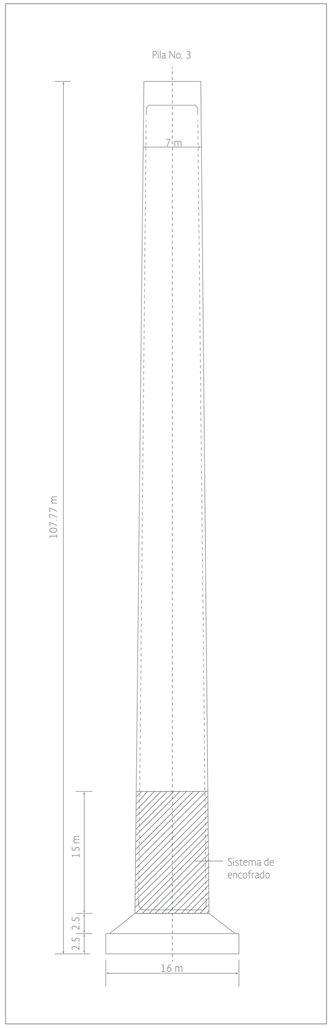
No. DE CARRILES: 4





Sección transversal





Antecedentes y objetivos

El puente se ubica en la autopista México-Tuxpan en el tramo Tejocotal-Nuevo Necaxa, que atraviesa los municipios de Huauchinango, Puebla y Acaxochitlán en el estado de Hidalgo, los cuales se encuentran dentro de la zona declarada por la Semarnat como Área de Protección de Recursos Naturales conocida como la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa; esto representaba un reto para fines constructivos, pues debía contarse con altos niveles de control de emisiones contaminantes además de procurar el mínimo impacto para el área mencionada.

Para construir dicho proyecto, la SCT, a través del Fideicomiso de Autopistas y Puentes del Golfo Centro, compró una franja de terreno con una longitud de 18 km por 100 m de ancho, con un total de 180 hectáreas, y asignó a la empresa constructora a cargo de la planeación del corredor México-Tuxpan, que consistió en construir una autopista con cuatro carriles con un recorrido total de 37 km y que incluyó la adecuación del entronque Nuevo Necaxa, la construcción de seis túneles, un total de 10 puentes, dos viaductos ecológicos, cuatro pasos a desnivel, cortes y terraplenes del terreno, obras de drenaje, entre otros.

Con este proyecto se logró disminuir el tiempo de recorrido en 1.5 horas entre el centro del país y el golfo de México, lo que deriva en una reducción de costos de operación vehicular y a incrementar la seguridad del trayecto. Tuxpan se convertirá —terminando toda la obra— en el puerto más cercano a la capital de la República mexicana y a la región centro del país, por lo que quedará potencializado el desarrollo de la región norte del estado de Puebla pues éste contará con una conexión directa al puerto y a la frontera, lo que facilita la comunicación del estado de Tamaulipas con el centro del país propiciando que Hidalgo pueda convertirse en un centro logístico de operaciones en relación con el resto del país.

Estudios preliminares

Quizá el mayor reto de este proyecto radicó en la importancia que se le dio a buscar un mínimo impacto negativo a las áreas forestales y a la fauna existente, por lo cual fue indispensable elaborar una *Manifestación de Impacto Ambiental*, en modalidad regional que fue evaluada por la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental de la Semarnat, (DGIRA), así como un *Estudio Técnico Justificativo* en la Delegación Federal Semarnat en el estado de Puebla. Sólo de esta forma podría autorizarse el cambio en el uso de suelo catalogado originalmente como forestal para designarlo posteriormente como vía de comunicación.

En el caso de la carretera México-Tuxpan se identificaron un total de 147 impactos que existirían en las diferentes actividades por realizar durante la obra, desde la etapa de preparación hasta la de operación y mantenimiento. Por esta razón, la Semarnat tuvo que autorizar de manera condicionada a la SCT la construcción de la autopista para proteger el bosque mesófilo de montaña y las diversas especies, tanto de flora como de fauna que lo habitaban. Las medidas consistían en realizar una indemnización a los propietarios de los predios; ejecutar un programa para rescate de las especies protegidas; reubicar a los animales encontrados en un hábitat similar; realizar desmontes alternados en horario diurno y nocturno durante la época de secas para permitir el desplazamiento de la fauna a lugares contiguos; capacitar al personal para la tala de árboles, además de una condicionante en particular, la de no arrojar los residuos desmontados sobre le vegetación aledaña y no rebasar la línea limítrofe del predio adquirido. Para esto se solicitó que, previamente al inicio de las obras se indicara la ubicación y superficies de los bancos de materiales y lugares de tiro que serían requeridos, los cuales deberían encontrarse exentos de cualquier área forestal o corrientes de agua, todo esto en conjunto con un anexo fotográfico y un video de dichos estudios que deberían entregar cuatrimestralmente ante la Profepa a manera de informe para tener la certeza de que se estaban llevando a cabo las actividades correspondientes de conservación.

Algunas condiciones fueron indicadas con el fin de no afectar el paisaje tales como: no acumular materiales en lugares no autorizados o no colocar anuncios de gran formato que afectaran la estética del paisaje u obstruyeran la visibilidad en la carretera.

Otras de las medidas indicadas por la Delegación Semarnat Puebla fueron las de establecer un programa de restauración y reforestación en una superficie no menor a las 100 hectáreas, incluyendo además el seguimiento por un periodo mínimo de cinco años, para así garantizar el establecimiento y la sobrevivencia de las áreas reforestadas.

Para la construcción del puente Texcapa sobre el río Totolapa se presentaron problemas de acceso por dentro del derecho de vía, debido a que la accidentada topografía del sitio impedía desarrollar un proyecto para el camino de acceso que garantizara la seguridad del personal y la maquinaria que sería utilizada. Con base en esto, se optó por hacer dos caminos de acceso por fuera del derecho de vía, lo que permitió realizar las labores de construcción con el mayor índice de seguridad y control requeridos.

Otro problema fue de tipo geológico, pues este puente se localiza en una zona donde se registra una importante fractura del terreno, de tal suerte que las laderas que conforman la cañada constituyen elementos dinámicos con una relativa juventud, lo que queda demostrado por medio de la presencia de acantilados en ambos bordes del cauce que, desde el punto de vista geológico, resulta de vital importancia tomar en consideración que existen altas probabilidades de que éstas registren movimientos eventualmente.

Enfrente: Las zapatas de concreto reforzado son de sección rectangular de 16 x 24 m aproximadamente y una altura de 5m. De las dos pilas que sostienen este puente la de mayor altura tiene 107.77m. Para el cimbrado de ambas pilas se utilizó el sistema VARIO, así como consolas de trepado, lo que en su momento fue una innovación en México. **Arriba:** Al estar localizado en una zona donde está registrada una importante fractura en el terreno (las laderas constituyen elementos dinámicos), fue de vital importancia darle un tratamiento especial de estabilidad al terreno adyacente, pues existen altas probabilidades de que se registren movimientos eventualmente, incluso derrumbes.

Cimentación

A partir del 10 de junio de 2008, el puente Texcapa es uno de los que cuenta con una mayor longitud entre los que integran la autopista México-Tuxpan, con un total de 365 metros.

La estructura la componen dos pilas, una de 85 m de altura y la segunda con 107.77 m. Cuenta también con dos estribos en los extremos del mismo para anclar el cuerpo del puente al terreno para los cuales se consideró una capacidad de carga de 60 t/m² del suelo en condiciones estáticas, y una capacidad de 80 t/m² en condiciones dinámicas.

Sin embargo, la mayor importancia de los apoyos que lo conforman radica en los dos cuerpos de pila que sostienen el puente en un sistema de doble voladizo, los cuales descansan sobre zapatas de concreto reforzado con una sección rectangular aproximada de 16 x 24 m y una altura en éstas de 5 metros.

Subestructura

Las pilas antes mencionadas tienen una geometría de sección rectangular hueca y sus dimensiones son variables entre el arranque y el cierre de las mismas. La pila de menor altura se levanta 95.3 m mientras que la pila mayor se eleva hasta 107.77 m sobre el fondo de la barranca. Ambas fueron fabricadas con concreto reforzado de la misma manera que los estribos que detienen el empuje sobre el terreno.

En este puente se empleó una solución eficiente para el cimbrado de las pilas mediante sistemas innovadores en México. Se trata de los sistemas *VARIO* y Consolas de Trepado tipo CB 160, que consisten en sistemas modulares de encofrado para cualquier altura y sección con un ajuste continuo que permiten el vaciado de concreto por tramos en la estructura; de esta forma se logra remover fácilmente la cimbra y reubicarla para un nuevo tramo de colado, con lo que se logra mayor rapidez y seguridad en el proceso.

Superestructura

Con una sección transversal de 19 m, de los cuales 14 m corresponden al ancho de calzada que aloja cuatro carriles de circulación (dos en cada sentido), la autopista México-Tuxpan está diseñada para una velocidad aproximada de 110 km/h, lo que hace posible que en tan sólo 18 km y en alrededor de 20 minutos, se logre cruzar parte de la Sierra Norte del estado de Puebla.

La característica que hace particular a este puente respecto del resto, es que posee una costilla por encima de la carpeta asfáltica; ésta tiene la función de ocultar parte de la estructura que lo sostiene a través de cables de acero. Esto lo convierte en el segundo puente más largo de México en utilizar este sistema constructivo, el Papagayo —en el estado de Guerrero— es el primer puente acostillado de la República mexicana, inaugurado en 1993.

El tramo de carretera donde se ubica el puente Texcapa comprende un sistema de pretensado con un alto índice de variables. El objetivo del acostillado que sobresale de la superestructura radica en contener los cables de pretensado en su punto más alto mientras estos se van distribuyendo a lo largo del tablero y quedan encapsulados dentro de una pared de concreto, lo que corresponde a la costilla visible. La doble joroba que alberga realiza la función de un símil de un sistema de atirantamiento; sin embargo, la ingeniería constructiva está más relacionada con un sistema tradicional de vigas pretensadas. En opinión de muchos, este tipo de sistema resulta mucho más atractivo que un sistema de vigas convencional.

El sistema constructivo de la superestructura está conformado por dovelas acostilladas de sección rectangular hueca, cada una con altura variable alrededor de los 3.17 m, que son colocadas con maquinaria mediante un sistema de izamiento logrando unir cada tramo con otro por medio de dovelas de ajuste. El ancho de estas dovelas es igual al ancho de vía que es de 19 metros.

La pendiente promedio del tramo es de 6%, con un espesor de losa de 22 cm sobre la cual se colocó carpeta asfáltica de 5 cm de grosor.

Labores de reforestación de la zona

Además de las tareas preventivas para evitar el impacto negativo, la SCT presentó ante la DGIRA un *Proyecto Integral de Restauración Ecológica* con actividades posteriores a la conclusión de la obra. Así se realizó el rescate de más de 50000 plantas y el establecimiento de un vivero registrado ante la Semarnat como Unidad de Manejo Ambiental, donde se almacenó, cuidó y reprodujo la flora extraída que posteriormente se utilizó como banco de extracción, para reubicarlas en distintas áreas de la zona.

El impacto originado por las labores constructivas duró aproximadamente 20 meses, que es el tiempo que se requirió para la construcción de las pilas, mientras que el tiempo total requerido para la construcción del puente fue de cuatro años. La obra fue inaugurada en el año de 2005, con un tránsito esperado de 1 500 vehículos al día durante el primer año de puesta en operación.

Lo más característico de este puente es la costilla que tiene encima de la carpeta asfáltica, la cual oculta los cables de acero que lo sostienen. Las dovelas son acostilladas de sección rectangular hueca, colocadas mediante un sistema de izamiento. Este diseño ya se había puesto a prueba con gran éxito en el puente Papagayo, de la autopista México-Acapulco.

La longitud total del puente es de 365 m con un ancho de calzada de 19 m. Lo soportan dos estribos y dos pilas que forman tres claros, dos en los extremos de 97 m y uno central de 171 m. La construcción del puente duró cuatro años dado lo inaccesible del terreno, el clima constantemente lluvioso y los cuidados que los constructores tuvieron del entorno ecológico.

Puente San Cristóbal
2006

EJE TRONCAL
México-Chetumal con
ramal a Tapachula

AUTOPISTA
Las Choapas-Ocozacoautla

UBICACIÓN
Tuxtla Gutiérrez-San Cristóbal
de las Casas
Km 024+921

ESTADO
Chiapas

TIPO DE PUENTE: Empujado / Lanzado

LONGITUD TOTAL: 324 m

No. DE APOYOS: 4

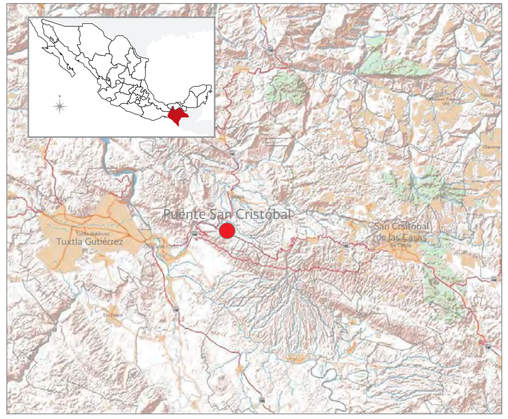
No. DE CLAROS: 3

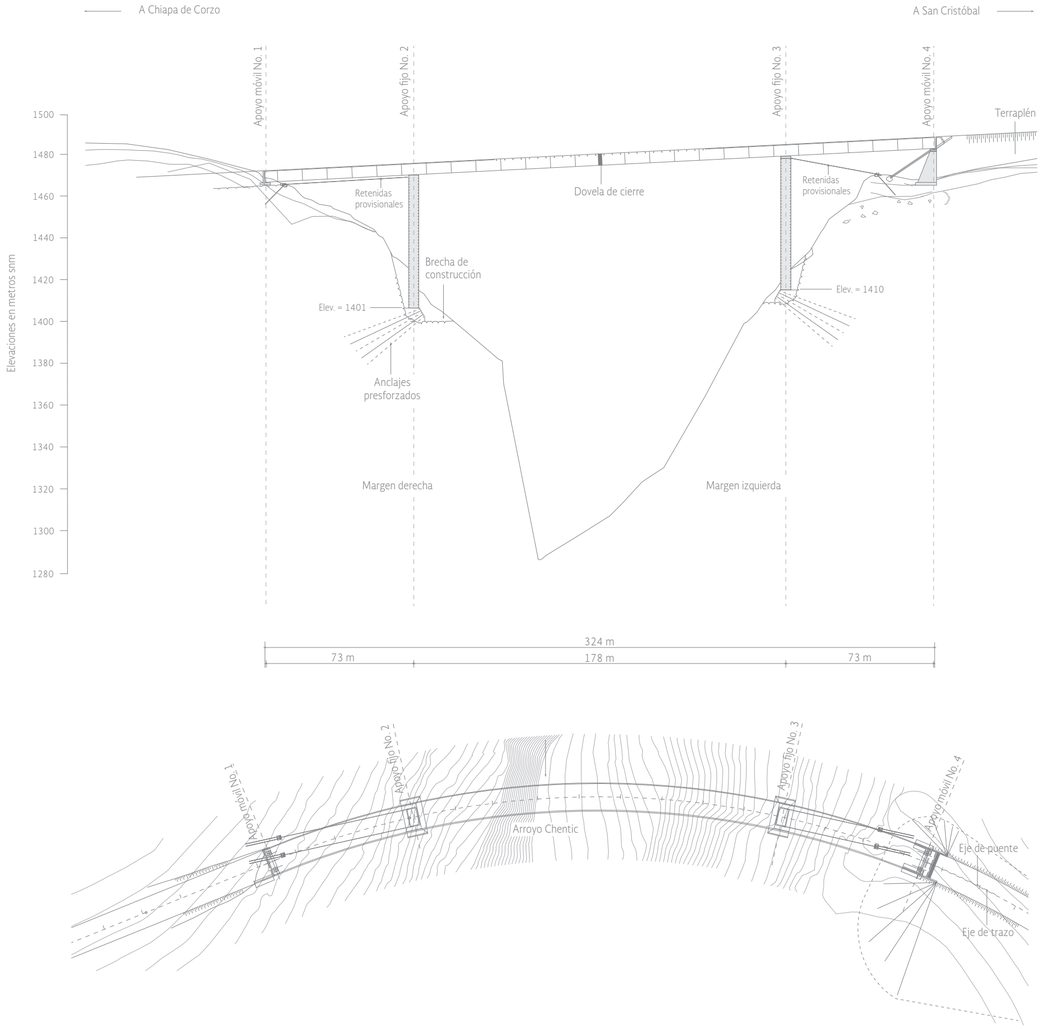
CLARO MÁXIMO: 178 m

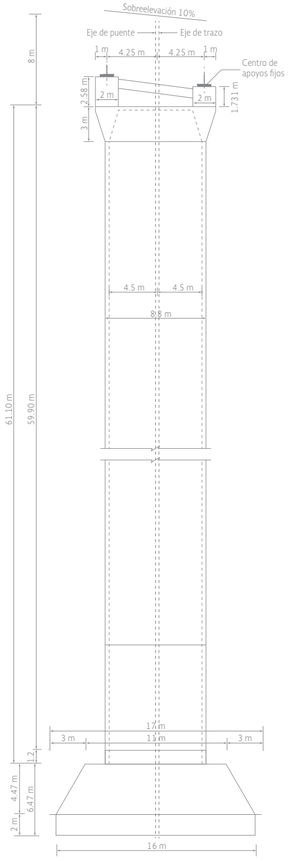
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 61.10 m

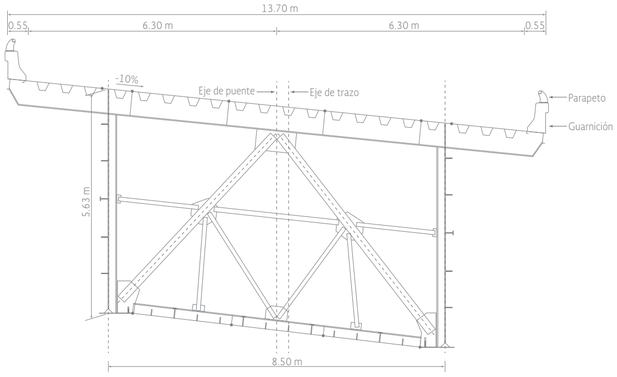
ANCHO TOTAL: 13.70 m

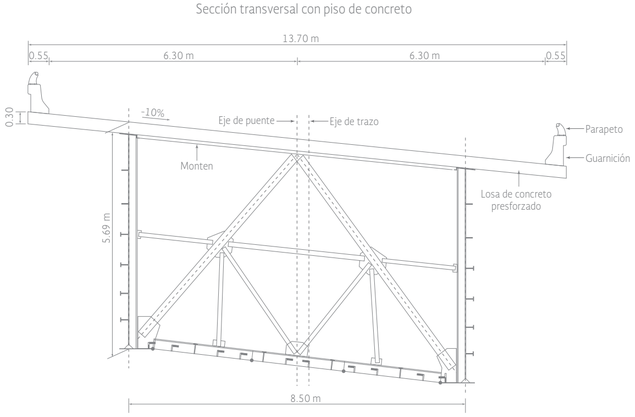
No. DE CARRILES: 2

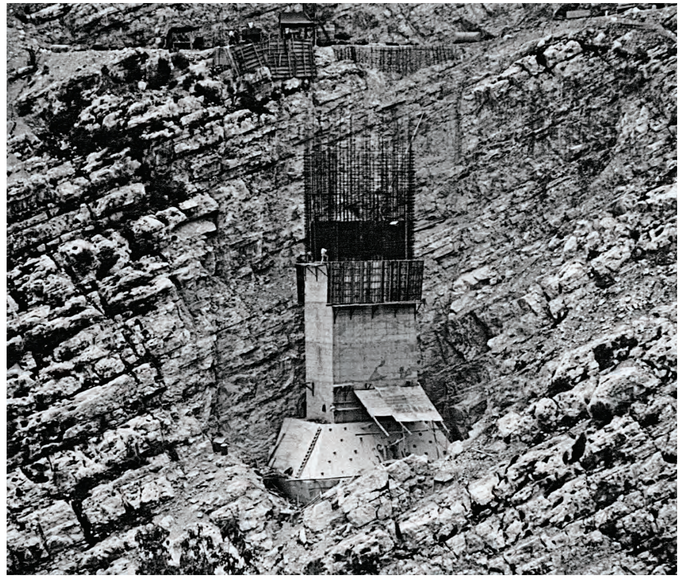


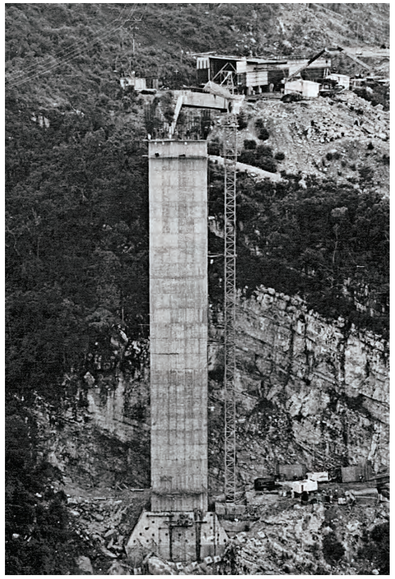












Antecedentes y objetivos

El proyecto de carretera tuvo como objetivo mejorar la comunicación entre las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas, en el estado de Chiapas. Debía cruzar una barranca con una profundidad aproximada de 200 m, conocida como barranca Chentic, sitio que por su accidentada topografía no permitía darle ningún uso al suelo, por lo que se hizo necesaria la construcción de un puente sobre ésta, en el km 24+291 que conectara ambos extremos de la barranca, siendo la estructura más importante de toda la carretera. Esta obra benefició a más de 275 mil habitantes de los municipios de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, Zinacantán y San Cristóbal de las Casas, al mismo tiempo que representa beneficios para el turismo que acude a visitar los atractivos de la cultura maya, encontrando entre los más representativos la reducción del tiempo de recorrido en más de 50%, pues pasó de 1 hora 45 minutos originalmente, a sólo 45 minutos de trayecto, además de incrementar los niveles de seguridad para el usuario y minimizar el uso de combustibles y la contaminación por hidrocarburos.

La localización preliminar del sitio se efectuó haciendo uso de fotografías aéreas estereoscópicas y fotointerpretación, así como de los estudios de mecánica de suelos.

Cimentación

Las cargas de la superestructura son transmitidas al terreno a través de una cimentación que sostiene a dos pilas y a dos estribos en los extremos.

La cimentación de los apoyos trapezoidales está conformada por zapatas de forma trapezoidal, fijadas al terreno a través de 34 anclas presforzadas en cada zapata. La resistencia del concreto en estos elementos es de 300 kg/cm².

Por otro lado, los estribos, localizados en los ejes 1 y 4, se apoyan sobre el terreno por medio de zapatas de sección trapezoidal a la cual se adicionaron, en el estribo 4, contrafuertes de sección rectangular unidos en la parte superior de estos por medio de cabezales también fabricados con concreto reforzado f'c= 250 kg/cm², lo que lo hace trabajar como un estribo resistente a los esfuerzos provocados por sismo. Cuenta ade-

Izquierda: Las zapatas sobre las que está cimentada esta estructura son de forma trapezoidal con un concreto de resistencia de 300kg/cm². Fueron fijadas al terreno con 34 anclas. Sobre éstas se desplantan las pilas de sección rectangular hueca. **Derecha:** Se utilizó cimbra tradicional para la construcción de las pilas, la cual quedó apoyada sobre la zapata verticalmente, se soportó horizontalmente por medio de tensores.

más en los extremos con dos puntales cuadrados de 0.80 x 0.80 m fijados al terreno natural por medio de ocho anclas presforzadas (cuatro en cada puntal) constituidas por varilla tipo DIWIDAG de 46 mm de diámetro y una profundidad de hasta 18 m resistiendo un esfuerzo de tensión máximo de 124 toneladas.

Subestructura

La subestructura se compone de dos estribos de concreto reforzado y dos pilas del mismo material, de sección transversal rectangular hueca, con secciones de 8.8 x 5 m y alturas de 61.10 m cada una. Las paredes mantienen un espesor constante de 0.35 m con un f'c= 300 kg/cm². Sin embargo, la profundidad máxima, desde la superestructura al fondo de la barranca, es de aproximadamente 200 metros.

Para la construcción de las pilas se utilizó cimbra tradicional, así como también en los estribos, zapatas y cabezales. Esta cimbra en su primera etapa de colado en el cuerpo de la pila se apoya sobre la zapata en el sentido vertical y por medio de tensores y separadores en el sentido horizontal. Una vez cimbrada esta sección y antes de iniciar el colado se realiza una verificación topográfica en ambos sentidos para certificar la geometría y verticalidad de la columna.

Superestructura

La superestructura la componen tres tramos: dos de ellos extremos de 73 m de longitud cada uno, y un claro central de 178 m, con una longitud de 324 m. El ancho de la calzada es de 13.70 m en la cual se alojaron los carriles de circulación de 3.50 m de ancho, dos acotamientos de 2.80 m cada uno y dos guarniciones laterales de 0.55 m cada una.

La superestructura fue construida por el procedimiento de empujado desde ambas márgenes y unida al centro del claro principal, dando lugar a dos vigas en voladizo. Una mitad de la superestructura se lanzó con la pendiente de manera ascendente y en el otro extremo el lanzado consideró la pendiente en forma descendente. Cada voladizo se forma con 14 segmentos o dovelas de 12 m de longitud cada una y 2 m para la dovela de cierre.

Se instalaron 28 dovelas de acero estructural A-709 grado 50 de sección cajón con almas verticales de 5.63 m de peralte, soldadas entre sí y resueltas en la parte superior por medio de dos sistemas: en la parte central 100.74 m por medio de estructuras metálicas ortotrópicas, y en el inicio del puente hasta 111.13 m, con una losa de concreto presforzado que se colocó en una cimbra perdida, formada por perfiles metálicos Monten. Toda la estructura está soldada entre sí para formar un elemento continuo.

El empujado de los segmentos se realizó con gatos hidráulicos sobre una cremallera de acero de chasis de empuje. Además, el sistema de empuje empleado garantizó un proceso de lanzamiento estable y controlado, y permitió el alineamiento horizontal y vertical de los segmentos del puente.

Para el empuje de ambas secciones fue necesaria la construcción de un parque de fabricación, el cual tenía una longitud de 108 m cuyo objetivo consistió en que el puente tuviera suficiente longitud y contrapeso para que éste no volcara antes de que la dovela No. 1 alcanzara la primera pila. Asimismo, en la zona anterior a los estribos 1 y 4, sirvió para colocar los equipos de empujado.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM participó en la supervisión de la construcción del puente San Cristóbal buscando con esto tres objetivos principales:

- Construir modelos por computadora para calibrar los datos que se medían con los instrumentos y así evaluar la capacidad estructural en diferentes partes del puente. Hacer un seguimiento de las condiciones de esfuerzo en diferentes dovelas del puente en tiempo real, registrando deformaciones, distribuciones de temperatura y velocidad del viento, entre otros factores que pudieran afectar el proceso de construcción y el comportamiento del puente.
- Verificar la calidad de la aplicación de la soldadura mediante pruebas de ultrasonido, partículas magnéticas y radiografías.

Apoyos deslizantes

Durante todo el proceso de lanzamiento y en todos los puntos donde el puente se apoya, ya sean pilas, estribos o parque de fabricación, se debe disponer de apoyos que pueden ser de dos tipos: provisionales o definitivos. El apoyo provisional se emplea en todas aquellas zonas en donde definitivamente no va a haber puente, como es el parque de fabricación.

Sobre las pilas y los estribos los apoyos pueden ser provisionales y sustituidos por los definitivos una vez que se haya terminado el puente, o disponer de los apoyos definitivos a los que se les añade un segundo nivel deslizante para utilizarlo durante el lanzamiento y retirarlos una vez que se termine este último.

El apoyo provisional está formado por un bloque de concreto fuertemente armado de 15 a 35 cm de espesor, sobre el cual se dispondrá de una placa de acero y encima de ésta una lámina de acero inoxidable pulida, tensada y perfectamente nivelada, sobre la cual se dispone de unas "almohadillas" de neopreno y teflón de 10 a 13 mm de espesor. La parte de neopreno va en contacto con el patín inferior de la superestructura y la de teflón con el acero inoxidable.

Izquierda: Para poder realizar el empuje fue necesaria la construcción de un parque de fabricación de 108 m de longitud, el cual funcionaba como un contrapeso para que el puente no colapsara. El empuje se realizó con gatos hidráulicos, además de garantizar un proceso estable y controlado. **Derecha:** Este puente cruza una barranca con una profundidad de aproximadamente 200 m. Tiene tres claros y está soportado por dos estribos y dos pilas. La longitud total es de 324 m, con un ancho de calzada de 13.70 m para dos carriles de circulación, dos acotamientos y dos guarniciones.

Los estribos del puente están hechos de concreto reforzado, cimentados en zapatas de sección trapezoidal. El estribo del eje 4 fue reforzado de tal forma que puede trabajar resistiendo los esfuerzos provocados por sismo. La zona anterior a los estribos sirvió para colocar los equipos de empujado.

Puentes El Piojito
2007

EJE TRONCAL
Transpeninsular de Baja California

AUTOPISTA
Cabo San Lucas-La Paz

UBICACIÓN
San Pedro-Cabo San Lucas
Km 0+500

ESTADO
Baja California Sur

TIPO DE PUENTE: Cajón continuo

LONGITUD TOTAL: 285 m

No. DE APOYOS: 11 en cada cuerpo

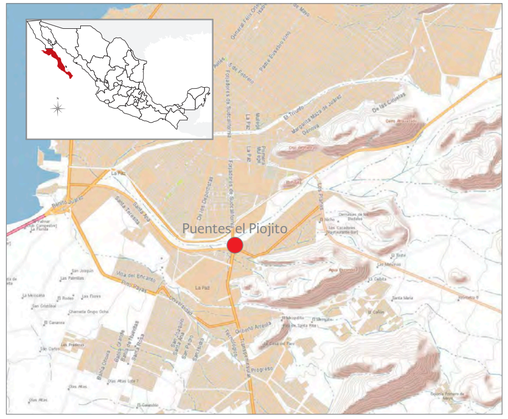
No. DE CLAROS: 10

CLARO MÁXIMO: 30 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 6 m

ANCHO TOTAL: 28 m

No. DE CARRILES: 3 en cada cuerpo



Estos puentes se encuentran en el kilómetro 0+500 de la carretera Cabo San Lucas-La Paz, en el estado de Baja California Sur, en el tramo carretero San Pedro-Cabo San Lucas. La estructura es también conocida como puente Mano Amiga y los puentes se alinean paralelos sobre el vado del arroyo El Piojito.

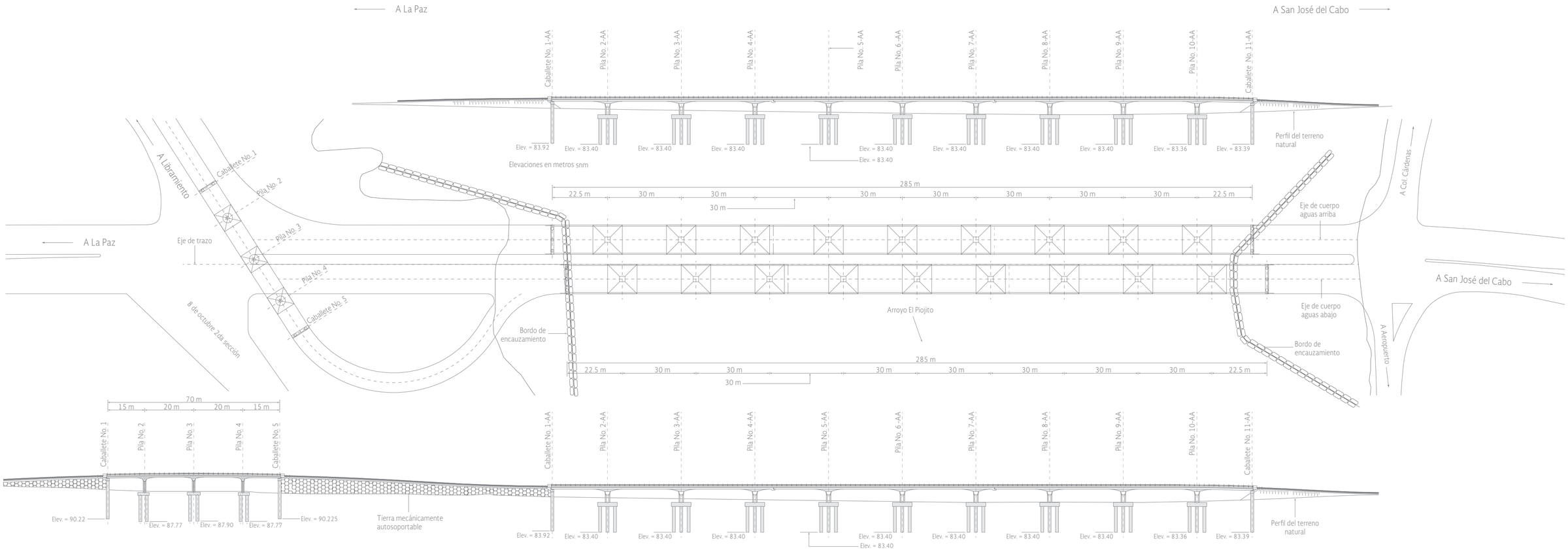
El diseño de estas estructuras es una innovación en México, por las características hidrodinámicas de la cimentación y la subestructura. La superestructura monolítica, presforzada longitudinal y transversalmente, hace que sean ligeros, lo cual es conveniente para la cimentación. Son puentes continuos con colados *in situ*, muy eficientes, ya que se usa poco material para su construcción. Este tipo de puentes se puede encontrar en países como Alemania y pueden llegar a salvar claros de hasta 70 m sin ningún problema. Arquitectónicamente es adecuado para zonas urbanas por sus características estéticas y de ahorro de materiales.

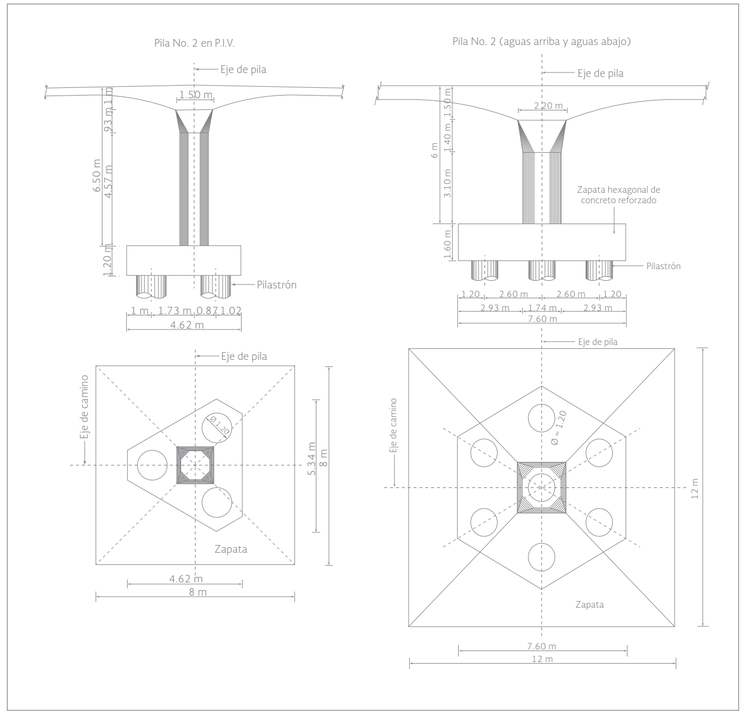
Antecedentes y objetivos

La carretera ubicada al sur del estado de Baja California Sur está formada por los tramos carreteros La Paz-Todos Santos-Cabo San Lucas, la cual ya era una de las principales vías de acceso hacia la capital. Sin embargo, adquiere mayor importancia en el año de 2006 cuando se nombró "Pueblo mágico", al municipio de Todos Santos por su vocación cultural, que a la vez ha sido testigo de una fuerte migración de extranjeros y nacionales. Por otra parte, la población se enfrentaba a diversos cortes en la circulación por las afectaciones en los caminos durante la temporada de huracanes que se evitarían con la construcción del puente, además de brindar una mayor comodidad al usuario, lo que se refleja en la reducción del tiempo de recorrido y la disminución del índice de accidentes de uno de los accesos más importantes a la capital del estado, cuyo beneficio alcanzaría a una población de 260 000 habitantes, además de promover el desarrollo turístico y económico entre los municipios de La Paz y Los Cabos.

En consecuencia, el gobierno del Estado de Baja California Sur llevó a cabo los estudios y proyectos para la construcción del puente a desnivel en el cruce del libramiento oriente de La Paz con la carretera transpeninsular como parte del programa de modernización y

Enfrente: Las características hidrodinámicas de la cimentación y la subestructura hacen que el diseño de esta estructura sea una innovación en México. La superestructura es monolítica presforzada longitudinal y transversalmente, lo que la hace más ligera. Además, al ser colocados *in situ*, también se reduce la cantidad de material en su construcción. **Arriba:** El puente está conformado por dos cuerpos, uno para cada sentido de circulación y tiene un espacio de 4 m entre cada uno. La calzada tiene un ancho de 12 m para alojar tres carriles de circulación en cada cuerpo, lo que brinda a los usuarios gran fluidez al momento de circular por él. La estructura fue diseñada para permitir desplazamientos por sismo, por temperatura y contracción. Aunado a esto, tiene juntas de dilatación a cada tercer tramo.


A La Paz
A San José del Cabo
Caballete No. 1-AA
Pila No. 2-AA
Pila No. 3-AA
Pila No. 4-AA
Pila No. 5-AA
Pila No. 6-AA
Pila No. 7-AA
Pila No. 8-AA
Pila No. 9-AA
Pila No. 10-AA
Caballete No. 11-AA
Perfil del terreno natural
Elev. = 83.92
Elev. = 83.40
Elev. = 83.36
Elev. = 83.39
Elevaciones en metros snm
285 m
22.5 m
30 m
Eje de cuerpo aguas arriba
Eje de cuerpo aguas abajo
A Col. Cárdenas
A Aeropuerto
A Libramiento
Caballete No. 1
Pila No. 2
Pila No. 3
Pila No. 4
Caballete No. 5
Eje de trazo
8 de octubre 2da sección
Arroyo El Piojito
Bordo de encauzamiento
70 m
15 m
20 m
Elev. = 90.22
Elev. = 87.77
Elev. = 87.90
Elev. = 90.225
Tierra mecánicamente autosoportable



Arriba: La cimentación está conformada por zapatas aisladas de dos tipos distintos: de base hexagonal regular de 4.5 m por lado, apoyadas sobre siete pilotes cada una. La otra es de sección hexagonal, la cual es de forma irregular, soportada sobre tres pilotes. La forma de las pilas que descansan sobre la zapata es lo que caracteriza a este puente, al ser de sección regular en su desplante para luego aumentar y convertirse en trapezoidal. **Enfrente:** El puente tiene una longitud total de 285 m y está conformado por un total de nueve apoyos intermedios cada 30 m. Gracias a la construcción de este puente se evitan los cortes de circulación en la zona del pueblo mágico Todos Santos, que antes se hacían en la temporada de huracanes.

apoyo a la infraestructura carretera que dicho gobierno ya estaba desarrollando en conjunto con la SCT como estrategia para la consolidación de centros turísticos, aumentar la competitividad económica, extender la comunicación y eliminar el aislamiento de las comunicaciones rurales, disminuir los desequilibrios regionales, así como brindar una mejor imagen urbana a la entrada sur de la ciudad.

Estudios preliminares

Se realizaron dos sondeos mediante la prueba de penetración estándar, que consiste en contar el número de golpes necesarios para que se introduzca a una determinada profundidad un muestreador cilíndrico de media caña de 52 mm de diámetro exterior y 35 mm del interior que permite obtener muestras de suelo alteradas representativas a 14.20 m y 13.55 m de profundidad, respectivamente, las cuales se clasificaron manual y visualmente en campo y posteriormente se enviaron al laboratorio para su análisis y clasificación correspondiente.

De acuerdo con la estratigrafía detectada, a las condiciones topográficas y a las propiedades de resistencia al corte del subsuelo en el sitio, se hicieron las siguientes recomendaciones: emplear una cimentación profunda mediante pilas de concreto reforzado de 1.20 m de diámetro, coladas en el lugar, trabajando por punta y desplantadas como mínimo a 7.50 m bajo el nivel del terreno natural, considerando una capacidad de carga admisible para fines de diseño de alrededor de 200 t/pila, y estabilizar las excavaciones realizadas para alojar las pilas mediante lodos bentoníticos.

Cimentación

Está conformada por 54 pilotes, con un diámetro de 1.20 m cada uno, que sostienen las zapatas de cimentación y se encuentran desplantados a una profundidad máxima de 10.50 m en donde se encuentra la capa resistente cuya capacidad de carga individual es de 205 toneladas.

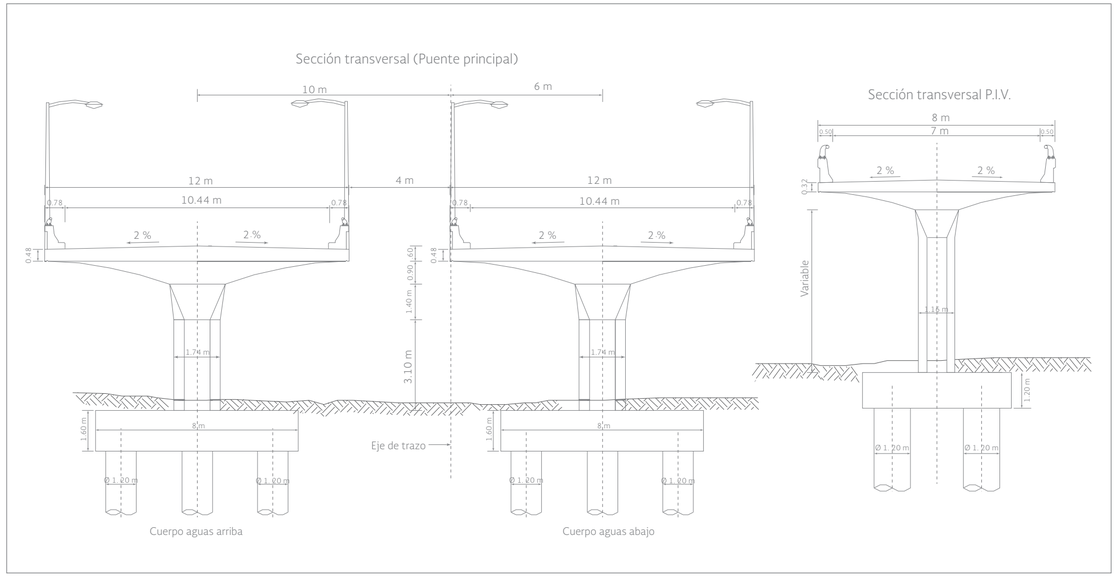
Las zapatas se encuentran aisladas a una distancia de 30 m entre ejes. Hay dos tipos de zapatas: el primer tipo tiene una base hexagonal regular de 4.50 m por lado y un peralte de 1.60 m, un ancho total de 7.60 m y están apoyadas sobre siete pilotes cada una. El segundo tipo de zapata también tiene una sección hexagonal, pero ésta es irregular y de menor dimensión a las anteriores, de lado mayor de 5.35 m, con un peralte de 1.20 m y están soportadas por tres pilotes cada una de ellas. Los pilotes están colocados radialmente al eje de cada zapata.

Es importante mencionar que la forma hexagonal de las zapatas evita que se generen problemas de socavación en el arroyo.

Subestructura

Las pilas que descansan sobre las zapatas son de sección octagonal irregular; la de mayor dimensión tiene un ancho total de 2.20 m y la de menor sección, 1.74 m. La forma de estas pilas es lo que hace a este puente especial, ya que comienza siendo de sección regular para luego aumentar en la parte superior y convertirse en trapezoidal hacia el exterior, haciendo de ésta una configuración de paraguas invertido, formando una estructura monolítica con la losa. La altura de las pilas varía de 5.50 a 6.00 metros.

Los estribos del puente cuentan con apoyos tipo *Tetron* que permiten el desplazamiento longitudinal



de la estructura; transversalmente el movimiento está restringido.

Superestructura

Se trata de un sistema continuo colado *in situ* con cimbras desplazables; es de tipo *Gerber* y soporta una losa monolítica con un espesor mínimo de 48 cm. Respecto de la superestructura, la parte de la calzada está integrada a la propia columna. La sección más gruesa de la losa está sobre la pila y se va desvaneciendo hasta llegar a la parte central del claro.

El ancho total de la calzada es de 12 m para alojar tres carriles de circulación en cada cuerpo, dejando un espacio libre entre ellos de 4 m; la longitud total del puente es de 285 m. Los nueve apoyos intermedios se encuentran a una distancia de 30 m a ejes, formando ocho claros y cuenta con dos claros de 22.50 m que unen al puente con los estribos.

Esta estructura permite desplazamientos por temperatura, por sismo y por contracción. Cuenta con juntas de dilatación cada tres tramos.

Puente La Pinta
2008

EJE TRONCAL
Mazatlán- Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
Durango-El Salto
Km 52+680

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 320 m

No. DE APOYOS: 4

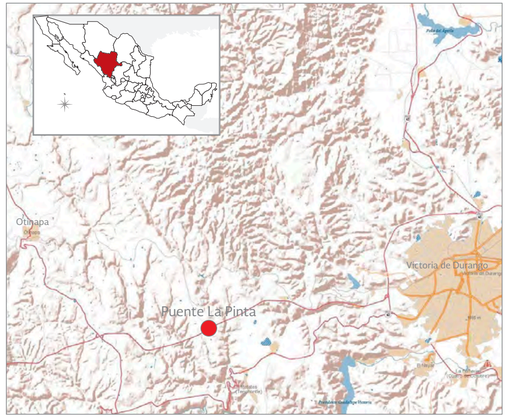
No. DE CLAROS: 3

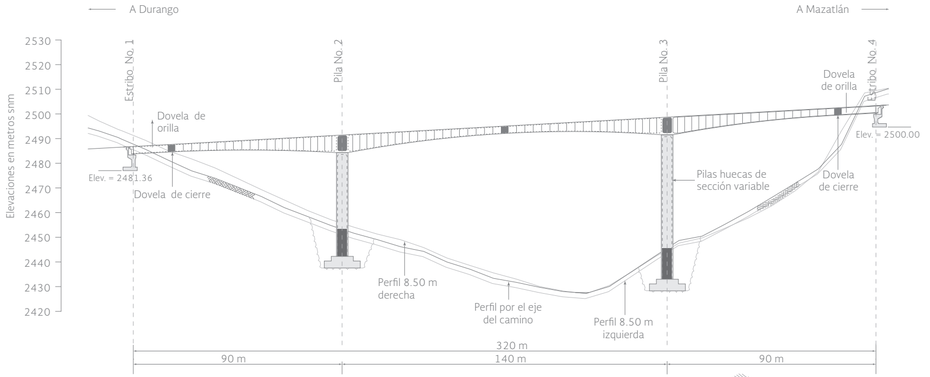
CLARO MÁXIMO: 140 m

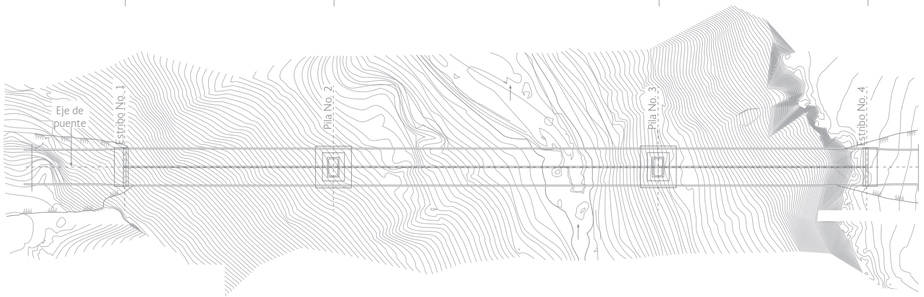
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 62.57 m

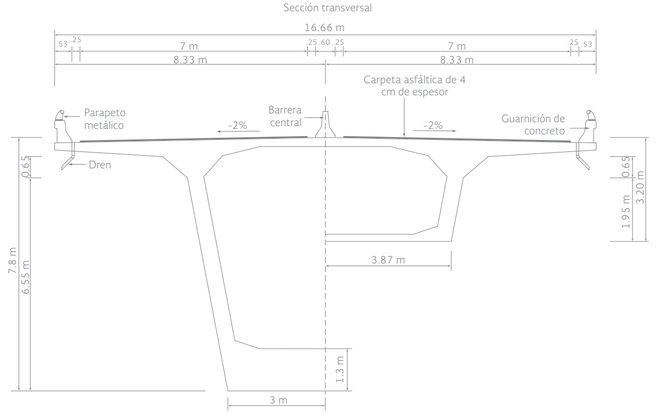
ANCHO TOTAL: 16.66 m

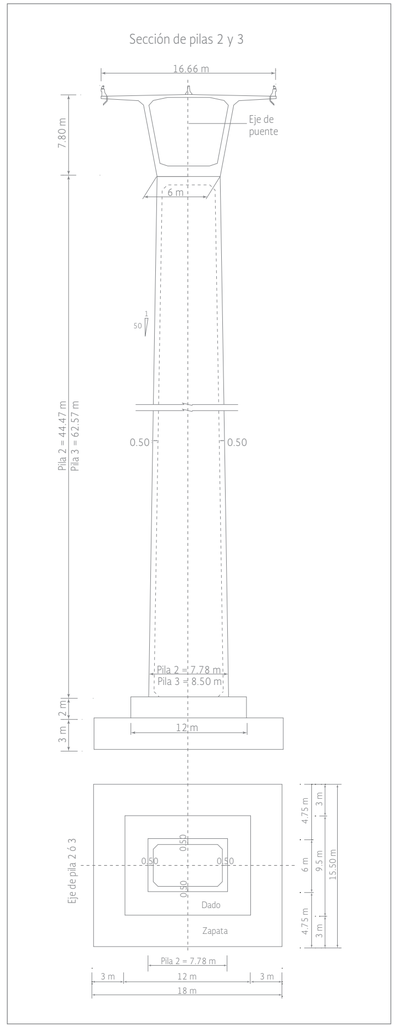
No. DE CARRILES: 2











En el eje carretero que parte del municipio de Matamoros, Tamaulipas hacia el municipio de Mazatlán, en Sinaloa, se inserta la autopista Durango-Mazatlán, que cruza el poblado de Otinapa, en el estado de Durango, en el km 52+680 en las zonas más elevadas de la Sierra Madre Occidental, a 2509 m sobre el nivel del mar; fue donde las condiciones orográficas demandaron la construcción del puente La Pinta.

Antecedentes y objetivos

La modernización de este tramo carretero logró beneficiar de manera directa a 500 mil habitantes dentro de los municipios de Durango y Pueblo Nuevo, que ahora se transaladan de manera más rápida hacia la capital duranguense y a los poblados que antes quedaban aislados, además de aportar conectividad a miles de habitantes de los estados aledaños que transitan por la supervía Durango-Mazatlán. Al mismo tiempo contribuyó de manera significativa a la reducción del número de accidentes y del tiempo de recorrido en el trayecto.

Cimentación

De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos que fueron necesarios realizar para la ejecución del proyecto del puente La Pinta, se encontró una resistencia del terreno óptima alrededor de las 200 t/m²; sin embargo, para fines de diseño de la cimentación se consideró una resistencia que rondaba las 160 t/m².

Las pilas se encuentran cimentadas mediante zapatas de concreto reforzado f'c= 250 kg/cm² con dimensiones de 15.50 x 18.00 m y una altura de 3.00 m. Sobre éstas se armaron dados que reciben a las pilas y confinan a las zapatas; éstos con dimensiones de 12.00 x 9.50 m con una altura de 2 metros.

En cambio, las zapatas que reciben a los caballetes poseen dimensiones aproximadas de 16.66 x 6.00 m que varían ligeramente de acuerdo con las características y las propiedades físicas del terreno que condicionan la forma y dimensiones de la cimentación de estos apoyos.

Subestructura

La subestructura la conforman principalmente dos cuerpos de pila convencionales fabricados con base en concreto armado; se encuentran huecas en su interior y tienen un espesor de pared constante de 50 cm. La altura de la pila más baja, correspondiente al eje No. 2 es de alrededor de 44.5 m, mientras que la de la pila No. 3 es de alrededor de 62.6 m; el concreto con el que fueron fabricadas, al igual que en los estribos, posee una resistencia de 300 kg/cm².

En ambas laderas del puente fueron construidos los estribos que reciben al tablero y lo unen con la carretera en ambos sentidos. Sobre cada uno de éstos se colocaron apoyos tipo *Tetron* que reciben a las dovelas en voladizo y permiten ligeros movimientos longitudinales y transversales en estos elementos sin afectar o fracturar la estructura del puente. De igual manera se integraron topes sísmicos de neopreno con espesor de 2 cm que pueden recibir una descarga de hasta 650 toneladas.

Superestructura

La superestructura de este puente trabaja estructuralmente por medio de doble voladizo salvando una longitud total de 320 m y una altura sobre la barranca de hasta 76 m. La estructura se encuentra repartida en tres claros, siendo el mayor el claro comprendido entre ambas pilas con un total de 140 m, mientras que a los extremos, el claro entre los apoyos centrales y los estribos es de 90 metros.

El tablero aloja cuatro carriles de circulación, lo que le da un total de 16.66 m de anchura; sobre él se tendió una carpeta compuesta de asfalto con un espesor igual a 4 centímetros.

Los voladizos que forman cada tramo están constituidos por 20 dovelas en los claros de los extremos, y por 38 dovelas hacia el centro del puente; además de las dovelas de cierre, las dovelas sobre pila y las dos que unen al tablero con los estribos.

Las dovelas son huecas en su interior y, en este caso, mantienen una longitud comprendida entre los 3.05 m y los 3.6 m; sin embargo, el peralte de las mismas varía conforme a su ubicación en el tablero desde 3.2 m en las dovelas de cierre que son las que soportan el menor esfuerzo hasta 7.8 m en las dovelas sobre pila que son las que anclan la superestructura a los apoyos y transmiten la carga a la cimentación.

Las dovelas están fabricadas en concreto reforzado colado *in situ* con la ayuda de equipamientos móviles llamados carros de colado con una resistencia de f'c= 350 kg/cm² y tienen integrado el sistema de postensado con torones de cables en ambos sentidos. Los torones de este sistema están protegidos mediante ductos de lámina engargolada en toda su longitud.

Enfrente: Debido a la dureza del terreno encontrada gracias a los estudios de mecánica de suelos, fueron necesarias labores de excavación exclusivamente dentro del área necesaria para el armado y colado de las zapatas, de manera que no se extendieran demasiado los tiempos y costos de ejecución. Se utilizó cimbra tradicional con la finalidad de no tener que extraer un volumen mayor de material del terreno. **Arriba:** El puente La Pinta representa uno de los tres puentes construidos al este de la autopista Durango-Mazatlán para cruzar caminos fluviales de hasta 100 m de profundidad. Comprendidos entre Durango y El Salto, los tres puentes se caracterizan por dimensiones similares fabricados todos con concreto pretensado: Puente Neverías (2005), Puente Río Chico (2006) y el Puente La Pinta (2008).

Puente Guamúchil II
2008

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-La Concordia
Km 160+800

ESTADO
Sinaloa

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 269 m

No. DE APOYOS: 6

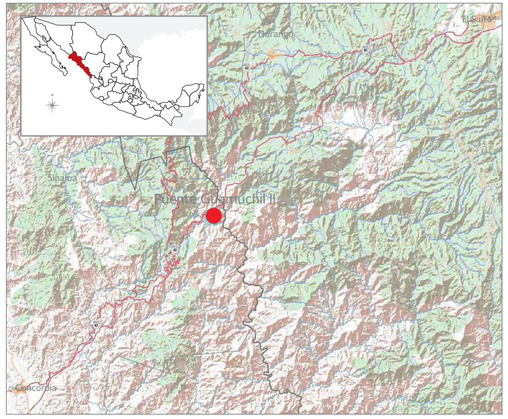
No. DE CLAROS: 5

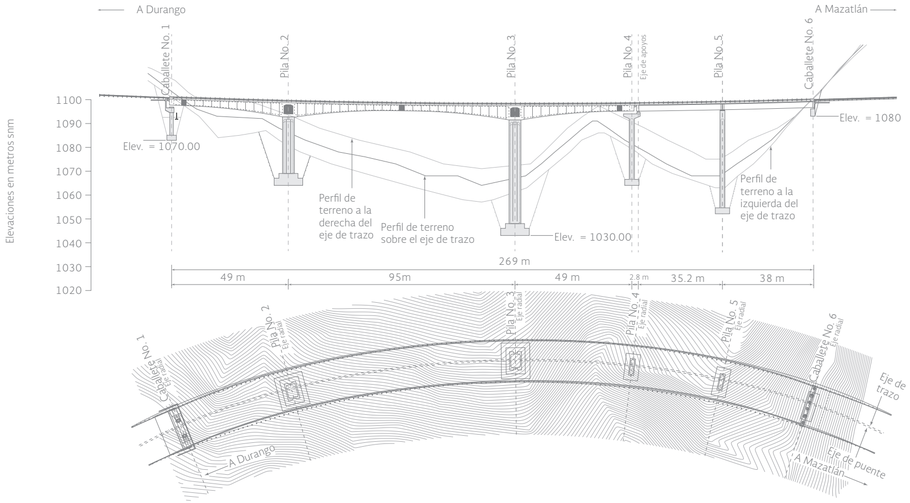
CLARO MÁXIMO: 95 m

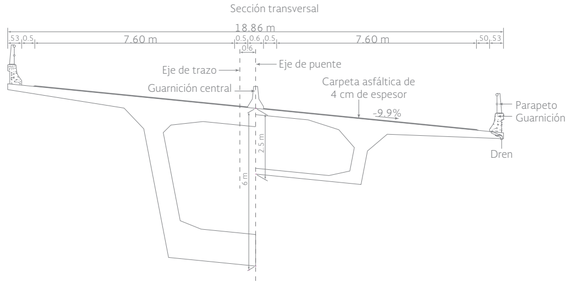
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 54.38 m

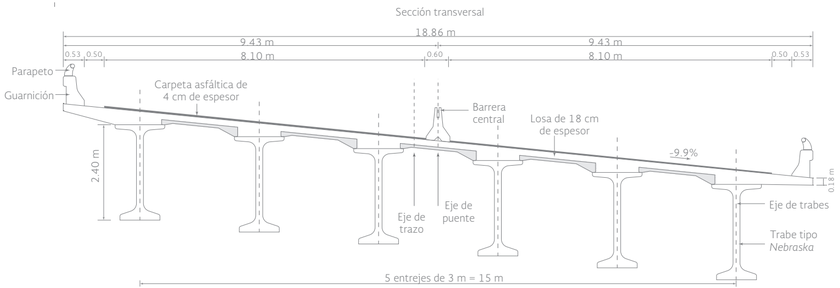
ANCHO TOTAL: 18.86 m

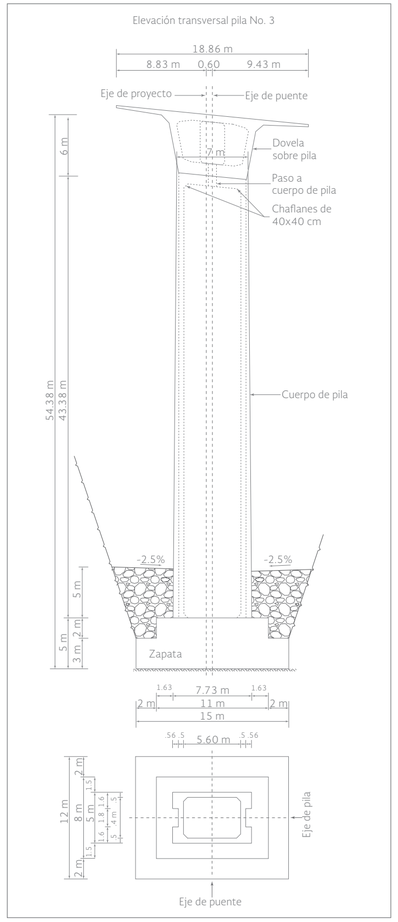
No. DE CARRILES: 4











El puente fue cimentado sobre zapatas de concreto reforzado cuyas dimensiones van de los 12 x 14 m, a los 12 x 15 m, en las cuales quedó apoyado un dado de 8 x 11 m y 2 m de altura. Las pilas sobre las que se encuentra soportado el puente son de sección rectangular hueca de 6.6 x 5.0 m, con un espesor de 50 cm en las paredes.

Antecedentes y objetivos

Sobre la autopista Durango-Mazatlán, en el km 60+800, en el tramo que se dirige de El Salto hacia La Concordia, muy cerca de la frontera entre los estados de Durango y Sinaloa, se encuentra el río Guamúchil, comprendido por una barranca de 27 m de profundidad que obligaba a los usuarios de la antigua carretera a rodear estos obstáculos, lo que derivaba en un amplio tiempo de traslado.

Para este inconveniente se pensó en la construcción del puente Guamúchil II para salvar un claro total de 269 m y desarrollarse en un tramo caracterizado por una curva.

Desde el inicio del proyecto se definió como un puente formado por dos tipos de superestructura; una conocida como sistema en doble voladizo y, otra con vigas tipo *Nebraska*, manteniendo una pendiente de aproximadamente 10 por ciento.

Estudios preliminares

Como parte de los estudios preliminares necesarios para la realización del proyecto se generó un estudio topohidráulico por encontrarse en un suelo con proximidad a un cuerpo de agua, con un margen de 80 m hacia cada lado del eje del puente.

El estudio fue complementado con un informe de conclusiones y recomendaciones además de los planos que respaldaron la información obtenida en campo, tales como bancos de nivel, datos de curvas, puntos sobre tangentes PST, etcétera.

De esta forma se pudo dar inicio al nuevo trazo y nivelación de eje de la autopista al contar con los planos necesarios para la correcta puesta en operación de los trabajos de edificación del puente.

Cimentación

Los estudios preliminares dieron como resultado que se habían encontrado variaciones en la resistencia del terreno respecto de los puntos específicos sobre los que se desplantarían los apoyos variando de 40 t/m² en el eje No. 5 hasta 70 t/m².

La cimentación en la zona de doble voladizo está constituida por zapatas de concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm² de sección rectangular y dimensiones entre 12 x 14 m y 12 x 15 m con una altura total de 3 m. Sobre éstas se conforma un dado con dimensiones apenas menores de 8 x 11 m y 2 m de altura, los cuales recibieron a la columna transmitiendo las cargas al terreno a través de la cimentación.

Los extremos del puente son recibidos en el terreno por dos caballetes, fabricados también con concreto reforzado, con una altura de 11.5 m en el eje No.1 y de tan sólo 3 m en el eje No. 6 de acuerdo con las características del terreno. Ambos se desplantaron sobre una cimentación superficial, con excepción del caballete sobre el eje No. 1 que tuvo que auxiliarse con dos columnas circulares de 1.50 m de diámetro para recibir al cabezal y transmitir los esfuerzos a la zapata con una dimensión de 3.80 x 12.00 m y 2 m de altura.

Subestructura

El puente Guamúchil II se encuentra apoyado sobre cuatro pilas de geometría rectangular y sección hueca fabricadas con concreto reforzado de 250 a 400 kg/cm². En la parte del sistema en voladizo la sección transversal de la pila es de 6.6 x 5.0 m con un espesor en paredes de 50 cm, mientras que en la parte construida con trabes *Nebraska*, la sección transversal es de 7.0 x 2.2 m con un espesor de pared de 40 cm. El menor de estos elementos mantiene una altura de 23.6 m mientras que el mayor alcanza hasta 43.38 m, librando sin mayor problema los 27 m de fondo que posee la barranca.

Una vez terminadas las pilas, se levantaron sobre éstas los cabezales en los que se desplanta la superestructura, cuya edificación fue dividida en dos sistemas constructivos, combinando el sistema de doble voladizo con el de vigas tipo *Nebraska*.

Sobre las pilas se construyeron los cabezales que reciben a la superestructura concebidos de forma trapezoidal con secciones variables entre 4.26 x 18.40 m y 7.00 x 16.50 m con un peralte de 2 m sobre los que se instalaron los apoyos multidireccionales tipo *Tetron* CD/GL 2000, con capacidad de hasta 204 toneladas cada uno y un espesor de 10 cm. En los caballetes se cuenta con topes sísmicos de neopreno de 25 x 40 cm con un espesor de 2 centímetros.

Las juntas de calzada en ambos extremos del puente son tipo FT-150, y en la unión de las dos estructuras se utiliza una junta tipo WOSD50.

Superestructura

La superestructura fue subdividida en dos tramos desarrollados por medio de dos sistemas constructivos distintos. El primer tramo, concentrado entre los ejes 1 y 4, fue constituido por medio de elementos en doble voladizo, mientras que el segundo tramo, comprendido entre los ejes 4 y 6, se hizo con la ayuda de vigas tipo *Nebraska* con claros de hasta 38 metros. El tramo en doble voladizo mantiene un claro central de 95 m y dos claros laterales con 49 m cada uno, sumando entre los tres 193 m de longitud. Los tramos se constituyen por un total de 56 dovelas de sección hueca, fabricadas con concreto reforzado con resistencia de 400 kg/cm² postensadas y peralte variable de 2.5 a 6 m. Sin embargo, todas mantienen un ancho de tablero de 18.86 m para el paso de los vehículos.

Por otra parte, el tramo de puente conformado por medio de vigas *Nebraska* cuenta a su vez con dos claros, uno de 35.2 m y otro de 38 m. Cada uno de éstos se conforma por seis trabes con un peralte de 2.4 m separadas a cada 3 m. Sobre éstas se desplantó la losa de concreto con 18 cm de espesor y una resistencia del concreto de hasta 250 kg/cm². Encima de ésta se encuentra la superficie de rodamiento conformada por una carpeta asfáltica con 4 cm de espesor.

Sobre toda la extensión del tablero se construyeron dos guarniciones con parapeto y un deflector central, conformando dos calzadas de 7.6 m de ancho para contener dos carriles de circulación en cada una de ellas.

Puente Río Rosas
2009

EJE TRONCAL
Libramiento Norte del Valle de México (Arco Norte)

AUTOPISTA
Pachuca-Tula

UBICACIÓN
Km 78+100

ESTADO
Hidalgo

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 255 m

No. DE APOYOS: 4

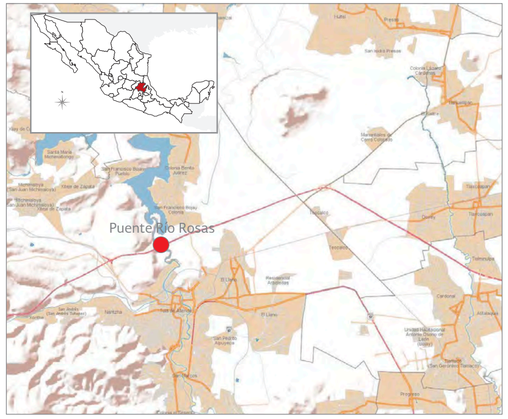
No. DE CLAROS: 3

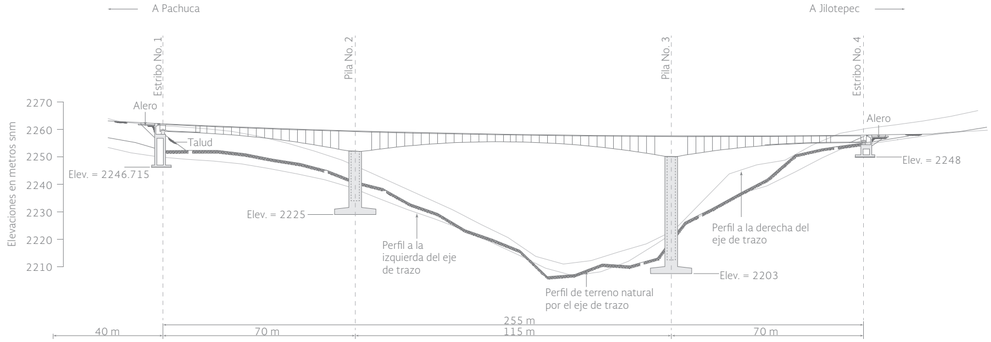
CLARO MÁXIMO: 115 m

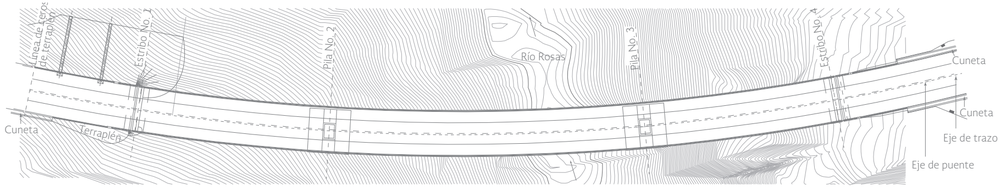
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 42.24 m

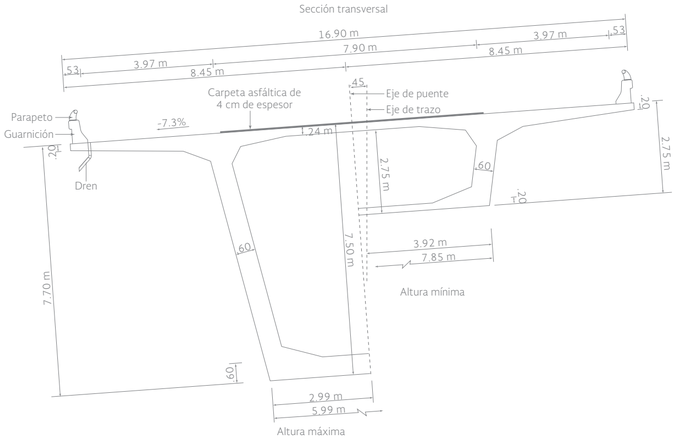
ANCHO TOTAL: 16.90 m

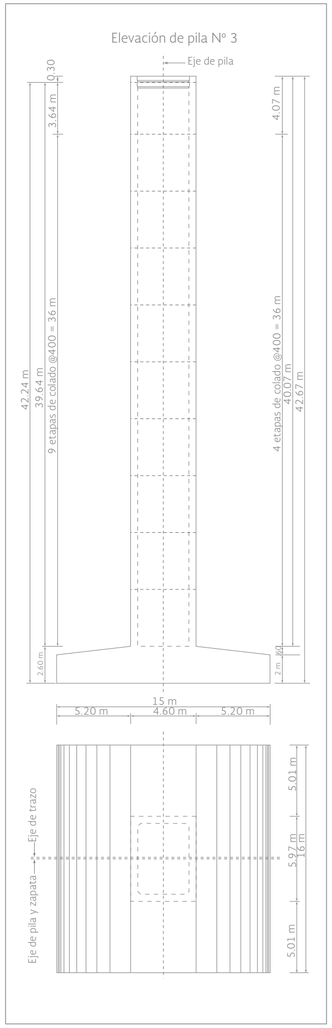
No. DE CARRILES: 4











Antecedentes y objetivos

Durante los primeros años del siglo XXI, las zonas metropolitanas de Pachuca, Tula y Tulancingo presentaron una gran concentración poblacional, lo que generó una creciente demanda sobre los recursos destinados al financiamiento de la construcción de nuevas obras, planes generales de desarrollo urbano, incremento en las actividades económicas y en la competitividad; esto sin dejar de lado el crecimiento de la calidad de vida de todos sus habitantes.

El estado de Hidalgo, a través de los recursos del Fondo Metropolitano, generó mejores oportunidades y mayores ventajas competitivas entre estas ciudades, logrando incentivar el desarrollo económico de la zona sur de la entidad mediante la ejecución de obras y acciones urbanas que garantizaron la viabilidad y la sustentabilidad, aprovechando de forma óptima los recursos humanos y ambientales de las zonas metropolitanas del estado.

Llevar a cabo infraestructura carretera resultó un eficiente detonador económico y social. La realización de un eje carretero que conectara la capital del estado con la zona metropolitana de Tula consiguió disminuir los tiempos de traslado, además de evitar problemas de tránsito que representaba un factor de riesgo para la población consiguiendo derivar en un eje carretero rápido y seguro que agilizare el traslado entre estos dos puntos. Es de estas necesidades que surge el proyecto para la creación del puente Río Rosas, ubicado en el km 78+100 sobre la carretera Pachuca-Tula hacia el sur del estado de Hidalgo, sobre el Libramiento Norte del Valle México, específicamente sobre el tramo Tula-Entronque México-Querétaro.

Cimentación

La cimentación estuvo realizada con zapatas fabricados en concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm².

Las dimensiones de las zapatas que soportan las pilas fueron del orden de 15 x 16 m, alcanzando 2.60 m de altura, mientras que las dimensiones de las zapatas sobre las que se apoyan los estribos en las laderas del puente mantienen una sección aproximada de 7 x 17 m con una altura de 0.80 metros.

Subestructura

El puente Río Rosas se apoya sobre dos pilas que salvan el claro del río, fabricadas con concreto reforzado, con una resistencia de 250 kg/cm². Son de sección rectangular hueca cuyas dimensiones de 5.40 x 4.60 m permanecen constantes durante las alturas de 42.24 y 20.50 m, respectivamente. Fueron coladas en tramos de 4.00 m de altura por medio del sistema de cimbras autotrepantes.

Los extremos de esta superestructura del puente están apoyados sobre estribos de concreto reforzado con la misma resistencia de material encontrado en las pilas. Sobre cada uno de estos estribos se colocaron dos apoyos del tipo *Tetron GL*, los cuales soportan una descarga de hasta 1000 toneladas cada uno.

Superestructura

La geometría resultante del puente es ligeramente curva, manteniendo una pendiente de entrada de 3.8% respecto del ancho de calzada que se va reduciendo hasta alcanzar tan sólo 0.5% en el tramo de salida, con un ancho total de 16.90 m más dos acotamientos que reducen la superficie de rodamiento a 15.80 m divididos en dos tramos de 7.90 m, con dos carriles de circulación en cada uno de ellos. Esta superestructura se eleva hasta salvar una altura de 47.00 m respecto del nivel de la barranca.

La característica constructiva de este puente es conocida como sistema de doble voladizo. De esta forma, la superestructura está conformada por tres claros: el central con una longitud de 115 m, y a ambos lados de éste, claros de 70 m cada uno que en conjunto suman una longitud total del puente de 255 metros.

A partir de las dos pilas que lo sostienen se construyeron de manera simultánea 17 dovelas hacia cada uno de sus lados llegando a un total de 68 segmentos desde 2.50 m hasta 3.00 m de longitud cada uno, con un peralte máximo de hasta 7.50 m y un mínimo de 2.7 m. Adicionalmente deben contabilizarse las dos dovelas que reposan sobre las pilas, más dos sobre los estribos y tres dovelas de cierre.

Están fabricadas con concreto postensado con una sección hueca tipo cajón, utilizando equipos móviles conocidos como cimbra deslizante, y carros de colado que permitieron el vaciado *in situ* con un concreto de 350 kg/cm² de resistencia.

En el caso de las dovelas sobre pila se colaron diafragmas que permitieran la conexión entre este elemento y la pila, utilizando una resistencia del material de hasta 350 kg/cm². Antes del colado de estos elementos se colocaron prelosas cuya función consistió en recibir a la dovela y apoyarla sobre una losa inferior de 30 cm de espesor; una vez que el concreto de ésta hubo alcanzado su resistencia óptima, se demolieron las prelosas sobre las que descansaba la dovela durante su fabricación.

Los cables que se colocaron para realizar el presfuerzo en la estructura poseen un diámetro de 15.3 mm y están formados por torones de baja relajación con resistencia al esfuerzo mínimo de ruptura de 18 850 kg/cm². Estos cables se tensaron en el momento en que el concreto alcanzó una resistencia a la compresión de 280 kg/cm².

A partir de cada una de las dos pilas sobre las que está sostenido este puente, se construyeron de manera simultánea 17 dovelas hacia cada uno de sus lados, además de las dos dovelas sobre las pilas, estribos y las tres dovelas de cierre. Para las dovelas sobre pila se colocaron diafragmas que permitieron la conexión entre estos elementos y la pila. Las pilas son de concreto reforzado y fueron coladas en tramos de 4 m de altura con cimbras autotrepantes. Las dovelas son de sección hueca tipo cajón. Fueron fabricadas con concreto postensado con una resistencia de 350 kg/cm², construidas con cimbra deslizante y carros de colado. **Arriba:** El puente Río Rosas (de 225 m) fue construido con el sistema en doble voladizo. Resulta importante pues forma parte de un corredor carretero planeado para conectar la zona centro del país. Une estados y municipios que hasta hace poco se comunicaban por caminos rurales e incluso terracerías. Este puente se dividió en tres claros, el central de 115 m y los dos de los extremos de 70 m cada uno.

Puente Yucalpetén
2009

EJE TRONCAL
Peninsular de Yucatán y México-Progreso

AUTOPISTA
Mérida-Progreso

UBICACIÓN
Mérida-Progreso
Km 34+000

ESTADO
Yucatán

TIPO DE PUENTE: Empujado / Lanzado

LONGITUD TOTAL: 573 m

No. DE APOYOS: 22

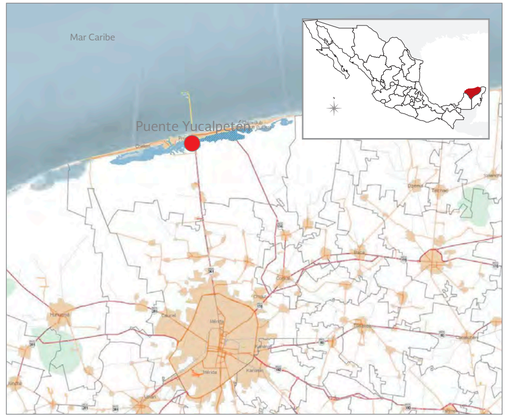
No. DE CLAROS: 21

CLARO MÁXIMO: 28.64 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 15.95 m

ANCHO TOTAL: 17 m

No. DE CARRILES: 4



Introducción

En agosto del 2007, sobre la carretera Mérida-Progreso, a la altura del km 34+000 se inició la construcción del puente Yucalpetén con el objetivo de resolver un problema de comunicación entre el puerto de abrigo Yucalpetén y la ciudad de Progreso que representa uno de los principales puertos de carga al sureste de la República mexicana, además de ser el centro pesquero más importante en el estado de Yucatán. Con este proyecto se recortó un total de 10 km de distancia en el recorrido entre estos dos puntos lo cual representa una ventaja de tiempo de 20 minutos, ahorro de combustible, una circulación fluida, rápida y segura, además de dar respuesta a las demandas de los sectores turísticos, pesqueros, industriales, portuarios y de la sociedad en general de esta zona.

Durante los 18 meses que duraron los trabajos para esta obra se crearon un total de 300 empleos directos, además de generar 600 empleos de manera indirecta. Asimismo, se benefició a un total de 800,000 habitantes de los municipios de Mérida, Progreso, Chelem, Chicxulub, Chuburná y Telchac, propiciando el desarrollo en el sector turístico y en el pesquero.

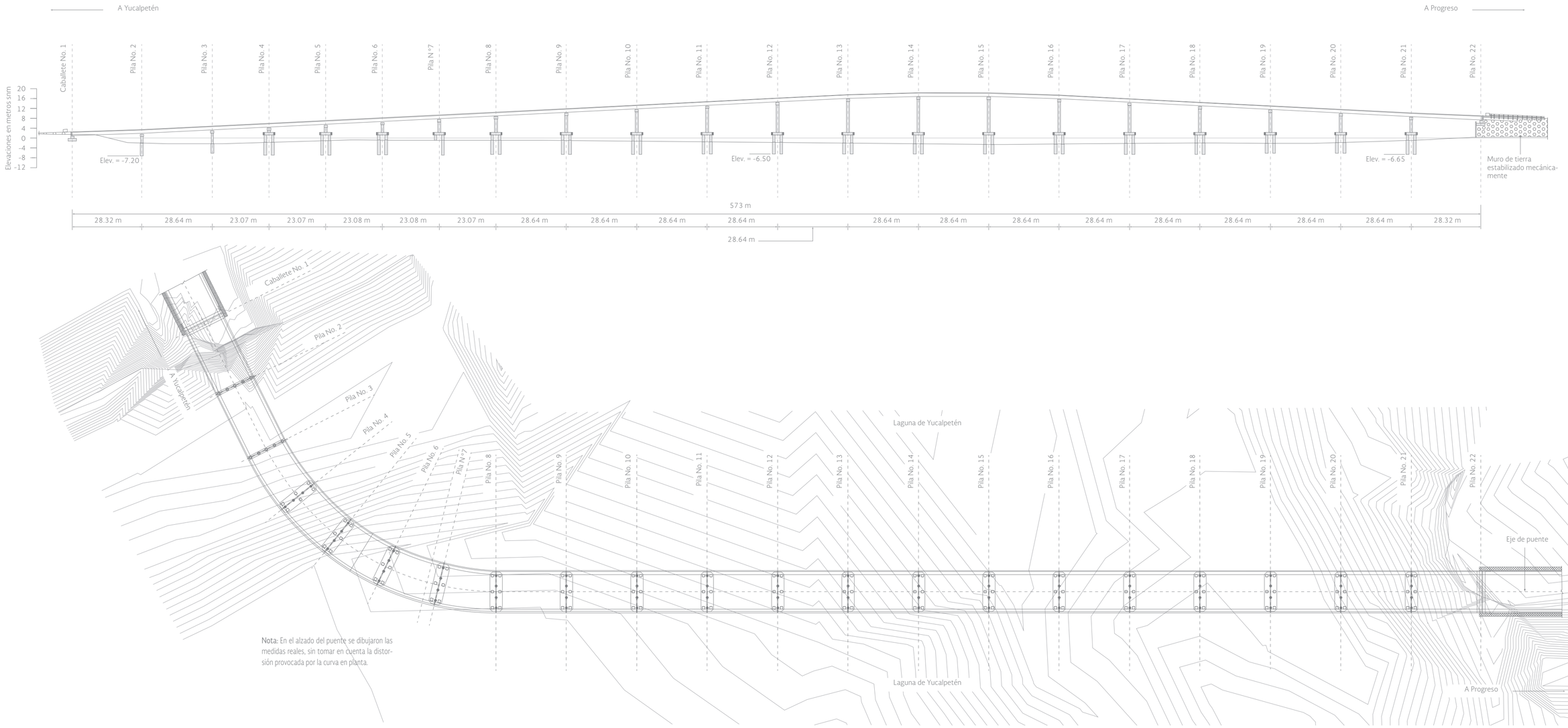
Adicionalmente, esta obra formó parte del programa de desarrollo federal que la incluía al proyecto carretero del Plan Puebla, así como al Plan Peninsular, lo que permitió incentivar el desarrollo industrial y comercial de la región.

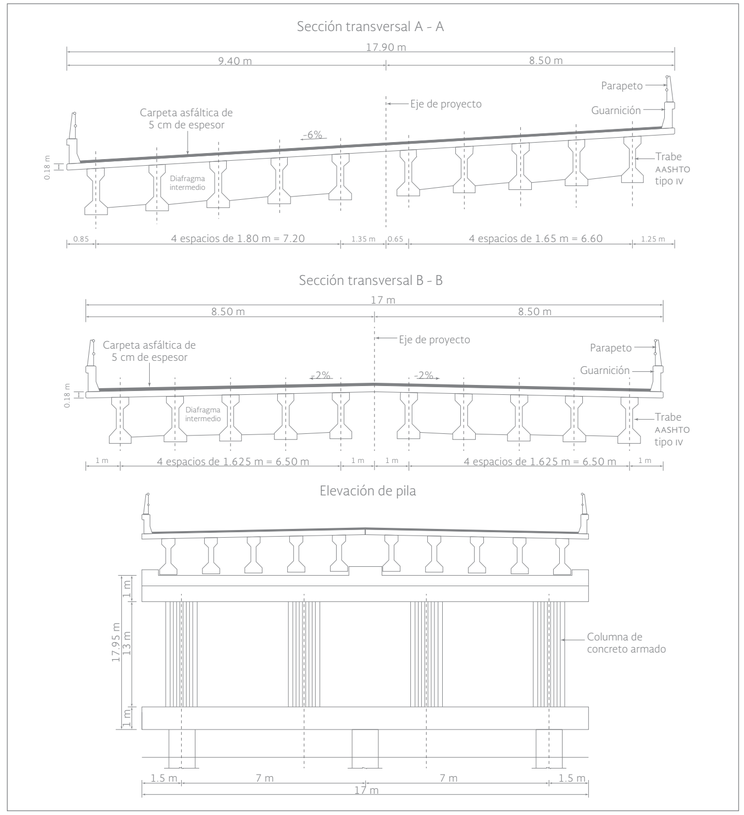
Estudios preliminares

Para poder llevar a cabo la ejecución de este proyecto fue necesaria la autorización de la Secretaría de Marina, instancia que se encarga de vigilar el área marítima de la República mexicana, debido a que los trabajos de construcción influirían ineludiblemente en la entrada al refugio pesquero de la zona de Yucalpetén, y el proceso constructivo demandaba estricta y permanente supervisión en el vertimiento de los materiales constructivos, que debido a sus componentes químicos y contaminantes podría provocar un efecto dañino prematuro en el ecosistema marino de la zona.

En cumplimiento de las normas ambientales, se contempló el monitoreo y la recolección de semillas de

El objetivo del puente Yucalpetén es resolver el problema de comunicación entre el puerto del que toma su nombre la obra y la ciudad de Progreso. Éste ha reducido un total de 10 km en el recorrido entre estos dos puntos y 20 minutos en ahorro de tiempo, además de un considerable ahorro de combustible.


A Yucalpetén
A Progreso
Elevaciones en metros snm
20
16
12
8
4
0
-4
-8
-12
Caballete No. 1
Pila No. 2
Pila No. 3
Pila No. 4
Pila No. 5
Pila No. 6
Pila N.º 7
Pila No. 8
Pila No. 9
Pila No. 10
Pila No. 11
Pila No. 12
Pila No. 13
Pila No. 14
Pila No. 15
Pila No. 16
Pila No. 17
Pila No. 18
Pila No. 19
Pila No. 20
Pila No. 21
Pila No. 22
Elev. = -7.20
Elev. = -6.50
Elev. = -6.65
Muro de tierra estabilizado mecánica-mente
573 m
28.32 m
28.64 m
23.07 m
23.07 m
23.08 m
23.08 m
23.07 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.64 m
28.32 m
28.64 m
Laguna de Yucalpetén
Eje de puente
Laguna de Yucalpetén
A Progreso
Nota: En el alzado del puente se dibujaron las medidas reales, sin tomar en cuenta la distor-sión provocada por la curva en planta.



Sobre las cuatro columnas que sirven de soporte para cada uno de los 20 apoyos, fueron armados los cabezales para recibir la superestructura, la cual está constituida por vigas tipo AASHTO IV, ligadas por un diafragma intermedio. Tiene un ancho de 17 m para cuatro carriles de circulación.

manglar, además de labores de protección y reubicación de la fauna y el monitoreo de calidad de las aguas con el fin de preservar el hábitat de la zona.

Cimentación

Debido a las condiciones especiales que se requerían para la cimentación, ésta se realizó con tres elementos esenciales.

En primer lugar se ejecutaron trabajos de perforación para preparar las cavidades necesarias para la colocación de los elementos para la cimentación. Después se realizaron trabajos de limpieza por dragado para contar con las condiciones propicias que no mermaran la resistencia de los elementos a colocar. Por último, en el terreno se hincaron pilotes de concreto armado de un diámetro de 1.20 m cada uno y altura variable hasta encontrar el manto resistente. Cada uno de estos cuerpos es capaz de resistir una carga de 250 toneladas. Sobre estos elementos se colocó un total de 118 pilotes, alrededor de seis por cada eje, de sección cuadrada hueca con dimensiones de 1x1 m cada uno y una altura promedio de 7 m que fueron posteriormente rellenados con concreto f´c= 300 kg/cm².

Finalmente, sobre estos pilotes se armaron zapatas de concreto reforzado con una resistencia de hasta 250 kg/cm² y secciones de 17 x 5 m con una altura de 1 metro.

Subestructura

Sobre las zapatas de concreto reforzado se dispusieron cuatro columnas por eje con un diámetro de 1.20 m cada una, coladas con concreto reforzado de 250 kg/cm². Sobre las columnas se armaron cabezales para recibir a la superestructura con dimensiones de 17 m de largo con un ancho de 1 m y un peralte uniforme de 1.35 metros.

Por otro lado, los estribos ubicados en las laderas del puente que reciben al tablero del mismo tuvieron que ser construidos con tierra mecánicamente estabilizada para evitar el deslizamiento del terreno.

Superestructura

La longitud del puente es de 573 m, conformada por 21 claros que van desde los 23.07 m hasta los 28.64 m de largo, estructurados con 210 vigas tipo AASHTO IV con dimensiones de 0.66 x 1.35 m con entreejes desde 1.62 m en el tramo recto del puente hasta 1.80 m en el tramo curvo; y se encuentran ligadas por medio de un diafragma intermedio con f´c= 350 kg/cm² lo que le confiere continuidad estructural.

El tablero del puente tiene un ancho total de 17 m para albergar cuatro carriles de circulación para autos y dos carriles de circulación para bicicletas de 1.50 m de ancho cada uno. La losa fue elaborada con concreto armado y tiene 18 cm de espesor; sobre ésta se colocó carpeta asfáltica para rodamiento de 5 cm de grueso y cuenta con una pendiente transversal de 2% en el tramo recto y de 6% en el tramo en curva. Se instaló iluminación nocturna a todo lo largo de la calzada y en toda la estructura baja del puente. El gálibo mayor no excede los 17 m. Fue necesario construir y modernizar el acceso vial para el puente, así como ampliar el calado del canal de navegación.

La longitud del puente es de 573 m que se extienden en un total de 21 claros, los cuales tienen una distancia que va desde los 23.08 m hasta los 28.64 m. Esta notable obra está incluida en el proyecto carretero del Plan Puebla y en el Plan Peninsular, por ser parte del programa de desarrollo federal.

Puente Bicentenario
2010

EJE TRONCAL
Querétaro-Ciudad Juárez

AUTOPISTA
Av. Aguascalientes.
2º Anillo de circunvalación

UBICACIÓN
Crucero de las avenidas José María Chávez y Aguascalientes
Km 126+723

ESTADO
Aguascalientes

TIPO DE PUENTE: Arco metálico atirantado

LONGITUD TOTAL: 395 m

No. DE APOYOS: 11

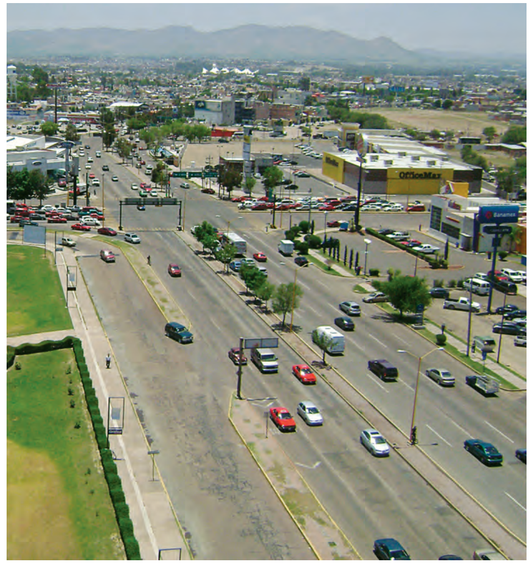
No. DE CLAROS: 10

CLARO MÁXIMO: 140 m

LONGITUD MÁXIMA DE TIRANTE: 24.4 m

ANCHO TOTAL: 16 m

No. DE CARRILES: 4



Dentro de la estructura vial de la capital de Aguascalientes, la avenida José Ma. Chávez no es solamente una de las principales vías de acceso a la ciudad desde el centro hacia el sur, sino que representa un segmento del eje que cruza toda la urbe de norte a sur. Paralela a ésta, en la misma dirección y en una longitud de cinco kilómetros, corre la avenida Mahatma Gandhi.

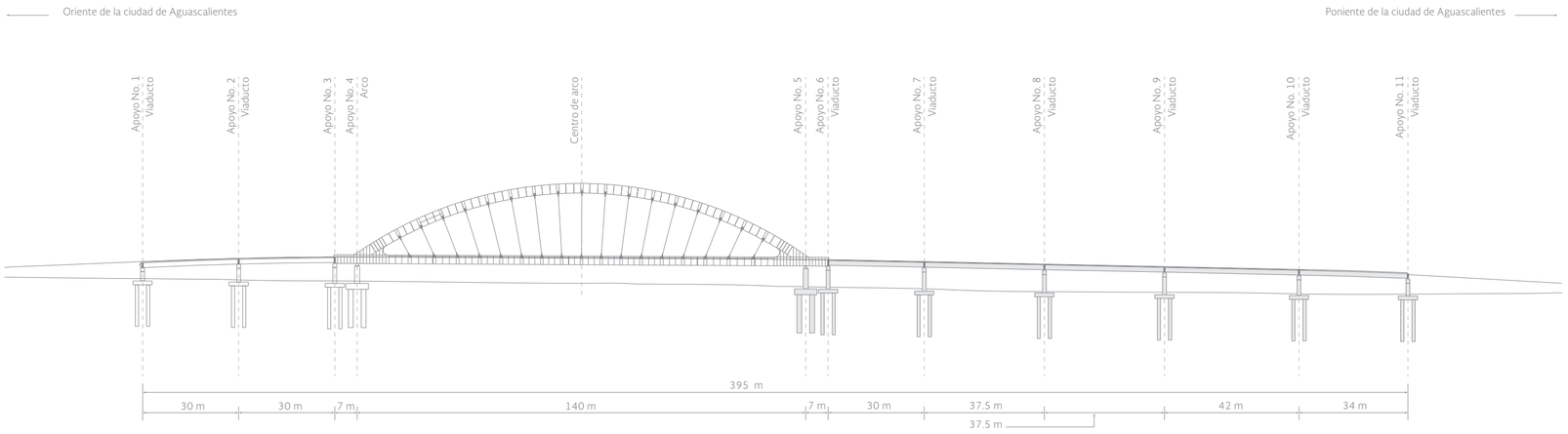
La ciudad cuenta además con tres conjuntos viales que forman anillos de circunvalación concéntricos en torno al casco antiguo, de los cuales el intermedio, formado por la avenida Aguascalientes, es el más transitado. Con un trazo que equivale a un cuadrado, esta avenida se ha transformado en vía de circulación continua de algunos años a la fecha, mediante pasos a desnivel en los cruces principales, del tipo que permite la circulación ininterrumpida a vehículos que siguen sobre la misma avenida.

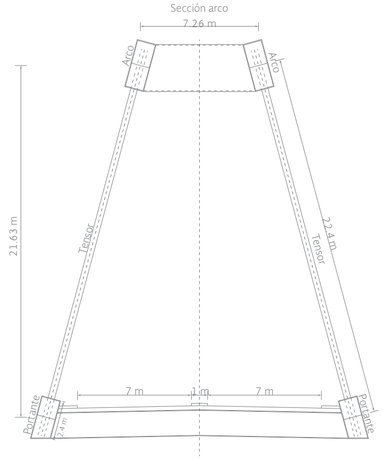
En 2008, los niveles de servicio en la intersección de las avenidas José Ma. Chávez y Aguascalientes eran francamente deficientes, por lo cual el gobierno municipal gestionó ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes considerar dentro del Fondo Nacional para Infraestructura una partida que permitiera dar una solución al problema. Por la proximidad de las dos avenidas que corren en dirección norte-sur, se tomó la decisión de abarcarlas dentro del mismo proyecto.

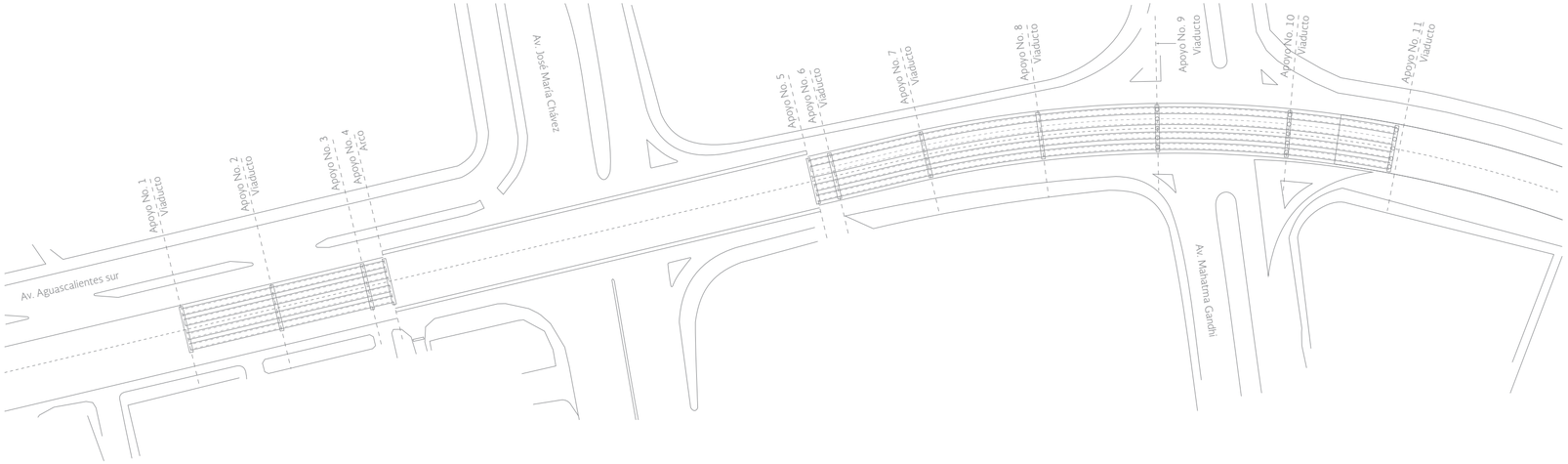
El beneficio es evidente, pues se propicia la fluidez del tránsito, cuyo aforo diario oscila en torno a 50 mil vehículos sobre Av. Aguascalientes, 40 mil sobre la José Ma. Chávez y 20 mil en la Mahatma Gandhi.

La obra inició en marzo de 2010 y se inauguró el último día de ese mismo año, por lo cual se decidió nombrarle Puente Bicentenario SCT. Dado que el atributo visual más sobresaliente es el arco que se tiende sobre el eje de la avenida José Ma. Chávez, hay quienes también se han referido al proyecto como "Puente Puerta Bicentenario", debido a que esa avenida se transforma hacia el sur, en la carretera federal No. 45, que continúa hacia la ciudad de León y es de hecho, la vía de acceso más directa entre Aguascalientes y el resto del país hacia el sur.

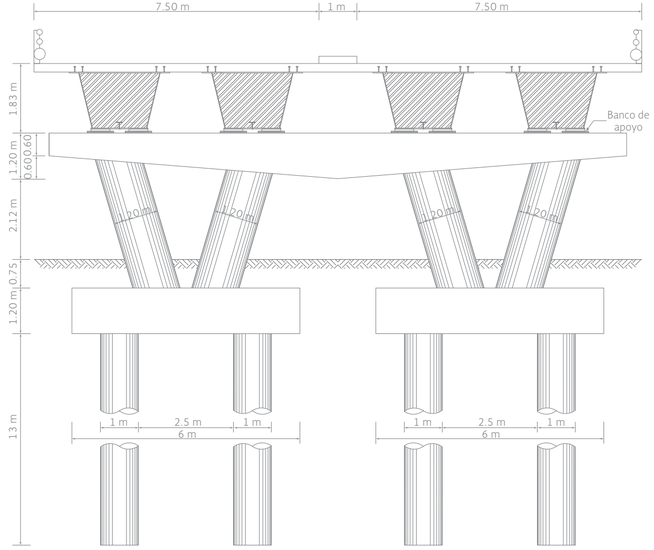
Enfrente: La obra en total incluyó el desmantelamiento de la señalización y alumbrado existentes; la pavimentación de arroyos vehiculares laterales y banquetas para peatones; la instalación de semáforos para controlar el tránsito de vehículos en los cruces a nivel, de alumbrado nuevo, tanto público como ornamental, la restitución de otras líneas de servicios municipales y el acondicionamiento de zonas ajardinadas a cubierto de la calzada de rodamiento, una de las cuales incluye una placa conmemorativa con pormenores acerca de la obra. **Izquierda:** Los niveles de servicio en la intersección de las avenidas José María Chávez, una de las principales vías de acceso a la ciudad, y Aguascalientes eran deficientes, debido a que ambas avenidas presentan una gran afluencia de vehículos. Por lo que se buscó una solución que diera fluidez al tránsito. **Derecha:** La estructura está en dirección oriente-poniente. Se integra con tres componentes básicos: dos viaductos y una estructura de arco atirantado. Las fotografías registran cómo era el paisaje antes de dar comienzo a la obra y el inicio del desplante de la cimentación del puente que se ha convertido en el presente en símbolo de la capital del estado.







Elevación de cabezal No. 1



El montaje de la estructura fue realizado con el apoyo de dos grúas que resisten 200 y 300 toneladas, respectivamente. Se comenzó por colocar las trabes portantes en su posición final, las cuales quedaron soportadas mediante andamiajes, lo que significó ensamblar ocho tramos con una longitud aproximada de 19 metros.

Descripción general

Se trata de una estructura que corre básicamente en dirección oriente-poniente y se integra con tres componentes básicos: dos viaductos y una estructura de arco atirantado. El viaducto oriente, que corre en tangente, comprende los apoyos 1 a 3, con dos claros de 30 m cada uno y junto a una rampa de aproximación, resuelve el ascenso de vehículos desde el nivel de calle hasta la altura de la estructura de arco. El arco atirantado, que comprende los apoyos 4 a 7, continúa la tangente y soluciona el cruce sobre la avenida José Ma. Chávez, con un claro central de 140 m y dos claros de 7 m cada uno en sus extremos. El viaducto poniente, que describe una curva hacia el norte, abarca los apoyos 7 a 11, con cinco claros que van de 30 a 42 m de longitud, más la rampa de aproximación. La función de este viaducto dentro del conjunto es doble, dado que con el claro de 42 m entre los apoyos 9 y 10 resuelve el cruce sobre la avenida Mahatma Gandhi, más adelante soluciona el ascenso de vehículos desde el nivel de calle. La longitud de las rampas es de 159.3 y 182.1 m, respectivamente; la del puente propiamente dicho es de 395 m y la de la obra en total, de 736.4 m medidos por el eje.

Cimentación

Consiste en 88 pilotes de concreto hincados a 15 m de profundidad. Los diámetro varían, según el caso. En los apoyos 1 y 11, a cada extremo de la estructura, el diámetro es de 120 cm, descansando las columnas de los apoyos directamente sobre el pilote respectivo. En los apoyos 2 y 3, y 6 a 10, los pilotes presentan un diámetro de 100 cm y sustentan zapatas de 6.0 x 6.0 x 1.20 m, cuatro para cada zapata. En los apoyos 4 y 5, el diámetro asciende a 150 cm y las zapatas miden 7.0 x 7.0 x 1.80 m, apoyada cada una también en cuatro pilotes.

El procedimiento constructivo para los pilotes se mantuvo constante: perforaciones del terreno mediante maquinaria; colocación de acero de refuerzo suministrado en obra, empleando varilla de 1" y ½" de diámetro y colado de los pilotes con concreto f'c = 250 kg/cm², mediante tubo *Tremie* a todo lo largo *in situ*. Para las zapatas se utilizó concreto f'c = 350 kg/cm².

Subestructura

El proyecto cuenta con cuatro tipos de apoyo. En el caso de los apoyos 1 y 11, cada uno consta de cuatro columnas cilíndricas de 120 cm de diámetro y un cabezal de sección constante; este tipo queda oculto dentro de la masa de las rampas de aproximación. En los apoyos 2 y 7 a 10, el número de columnas sigue siendo cuatro, pero éstas se yerguen inclinadas en ángulo de 30° respecto de la horizontal, formando dos grupos a la manera de una V, y rematan en un cabezal de sección variable. El peralte crece de los costados al centro, de 0.70 m a 1.20 m, con la cuerda superior horizontal y la inferior, inclinada, en tanto que el ancho de 1.40 m permanece constante. Los apoyos 3 y 6 presentan una forma similar a la anteriormente descrita; pero cuentan con tres pares de columnas en V cada uno y su cabezal se prolonga más allá del ancho de la calzada de rodamiento, para recibir las trabes longitudinales del arco portantes, mismas que se describen más adelante. Dichas trabes descansan también sobre los apoyos 4 y 5, conocidos como *Apoyos DIS*, que consisten en una estructura de marco, con columnas de 148 cm de diámetro. Estos apoyos están diseñados para tomar los esfuerzos por sismo y el cortante por viento, además de que aceptan los desplazamientos horizontales por cambios de temperatura.

Superestructura

La calzada de rodamiento se sostiene mediante dos tipos de estructura. Para todos los claros entre los apoyos 1 a 3 y 6 a 11, que corresponden a los viaductos, se tendieron cuatro trabes longitudinales por claro, tipo cajón y sección de trapecio invertido, donde la cuerda inferior es de 1.5 m y la superior, de 2.15 m. Fabricadas con placa de acero en secciones con longitud en torno a los 10 m, se ensamblaron *in situ*, a nivel de suelo, para después montarlas sobre los apoyos, se les agregaron después placas de arriostramiento a tercios de sus respectivos claros.

A los claros entre los apoyos 3 a 7 les corresponde la estructura de arco, que salva una distancia de 140 m en su claro central. La estructura consta propiamente de dos pares de trabes longitudinales portantes y arco, más tirantes y trabes transversales. Toda la estructura es de placa de acero estructural A-709 grado 50. Las piezas se fabricaron en una planta en Guadalajara y se empleó un total de 3 500 toneladas de placa.

Las trabes longitudinales presentan una sección trapezoidal constante, con peraltes de 2.72 y 2.40 m, respectivamente y un ancho de 1.20 m medido en el patín superior. Entre ambas se tienden a cada 5 m trabes transversales de sección I, que a su vez se conectan entre sí con nueve viguetas longitudinales, también de sección I, para constituir el entramado que soporta la losa del puente.

Los arcos siguen un trazo circular, cada uno se desarrolla sobre un plano inclinado que se intersecan con el del arco opuesto unos 30 m sobre el nivel del patín inferior de las trabes. La altura máxima de los arcos es de 21.64 m. Al igual que en el caso de las trabes, la sección de los arcos es constante: peralte de 3 m y 1.20 m de ancho. Los arcos no se tocan. Cada arco contribuye a la horizontalidad de la trabe portante mediante 17 tirantes. Se forman con 19 torones dispuestos en doble hexágono, de cable galvanizado de 5/8" de diámetro, encamisados o protegidos con una funda de polipropileno. La longitud de los tirantes varía desde 7 m hasta 22.4 m. En total se utilizaron del orden de 70 km de alambre.

El montaje de la estructura se realizó con el auxilio de dos grúas de 200 y 300 toneladas. Comenzó por colocar las trabes portantes en su posición final, mediante andamiajes, lo que significó ensamblar por cada una ocho tramos con una longitud del orden de los 19 m y 46 toneladas de peso cada uno. Terminadas las trabes longitudinales y con un cierto número de trabes transversales instaladas para rigidizar el conjunto, se procedió a ensamblar las dovelas de cada arco.

Se terminó primero el del costado norte, antes de proceder con el otro. Los tirantes se colocaron una vez que había sido terminada la losa. El tensado se realizó por el extradós del arco (anclaje móvil), dejando el anclaje fijo por el extremo de la trabe o cuerda portante. La secuencia del tensado, definida de acuerdo con el cálculo y resultado del modelo, se realizó desde los extremos hacia el centro.

Calzada de rodamiento

A todo lo largo de la estructura principal y viaductos se coló una losa de concreto armado de 22.5 cm de peralte, empleando el método de la lámina acanalada calibre 22, que actúa como cimbra muerta; fijada con pernos tipo *Nelson*, para recibir la calzada de rodamiento. Dicha calzada cuenta con un ancho de 16 m, con dos carriles de circulación en cada sentido, de 3.5 m cada uno, separados por un camellón central de un metro de ancho, y con parapetos de protección laterales sobre una franja de medio metro.

En cuanto a su perfil longitudinal, se desarrolla de la siguiente manera: inicia con una curva de transición cóncava, en la rampa de aproximación oriente, y asciende con una pendiente de 4% hasta el claro entre los apoyos 2 y 3, donde se encuentra la primera curva de transición convexa, entre el plano de ascenso y el claro principal.

Este claro se extiende con una pendiente de -0.5% hasta la segunda curva de transición convexa, sobre los apoyos 6 y 7, curva que incrementa la pendiente a -2.75%, a fin de mantener la superficie de rodamiento paralela a la inclinación del terreno. Una tercera curva de transición convexa localizada, entre los apoyos 10 y 11, marca el inicio de la rampa de aproximación poniente, cuya pendiente es de -5.5% hasta la curva de transición que adopta la inclinación natural de la avenida.

Las rampas de aproximación se construyeron con materiales graduados y estabilizados mecánicamente por el sistema de terraplenes armados o muros mecánicamente estabilizados. El terraplén, la capa subyacente y la subrasante se compactaron a 95%, 100% y 100%, respectivamente. El pavimento se realizó con una capa de 30 cm de espesor de base hidráulica y 10 cm de carpeta asfáltica.

La unión entre los viaductos y las rampas de aproximación se resolvió instalando juntas de caucho EPDM reforzado con tela, que forman un sello continuo.

Entre los viaductos y el tramo de arco, se emplearon juntas de expansión diseñadas expresamente para grandes movimientos (aquellos que exceden los 10 cm). Se fabricaron sobre medida, a fin de atender las condiciones particulares de cada caso. Se trata de un sistema de barras metálicas colocadas en el sentido transversal al flujo de vehículos, unidas entre sí por perfiles de sellado con sección en V para obtener una superficie de rodamiento estanca y suave. Dichas barras descansan sobre soportes múltiples de acero, sostenidos mediante baleros y resortes dentro de un cajón preparado *ex profeso* en la losa de la estructura del puente y equipados con un sistema que mantiene la equidistancia entre las barras, independientemente de la magnitud de los movimientos.

Las trabes longitudinales tienen una sección trapezoidal constante, con peraltes de 2.74 m y 2.40 m y un ancho medio de 1.20 m en el patín superior. Entre ambas trabes se tienden a cada 5 m otras transversales que a su vez se conectan entre sí con nueve viguetas longitudinales.

Puente Nuevo Tonalá
2010

EJE TRONCAL
México-Campeche

AUTOPISTA
Villahermosa-Coatzacoalcos

UBICACIÓN
Villahermosa-Coatzacoalcos
Km 041+532

ESTADO
Tabasco

TIPO DE PUENTE: Empujado

LONGITUD TOTAL: 299 m

No. DE APOYOS: 7

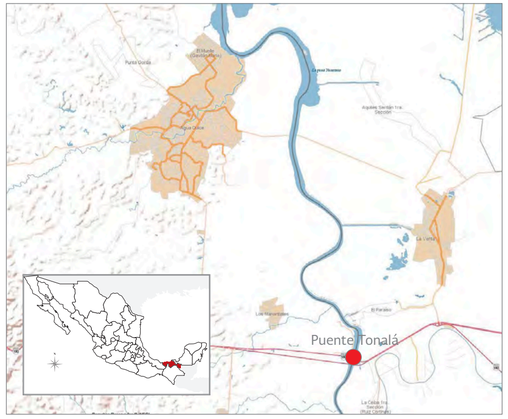
No. DE CLAROS: 6

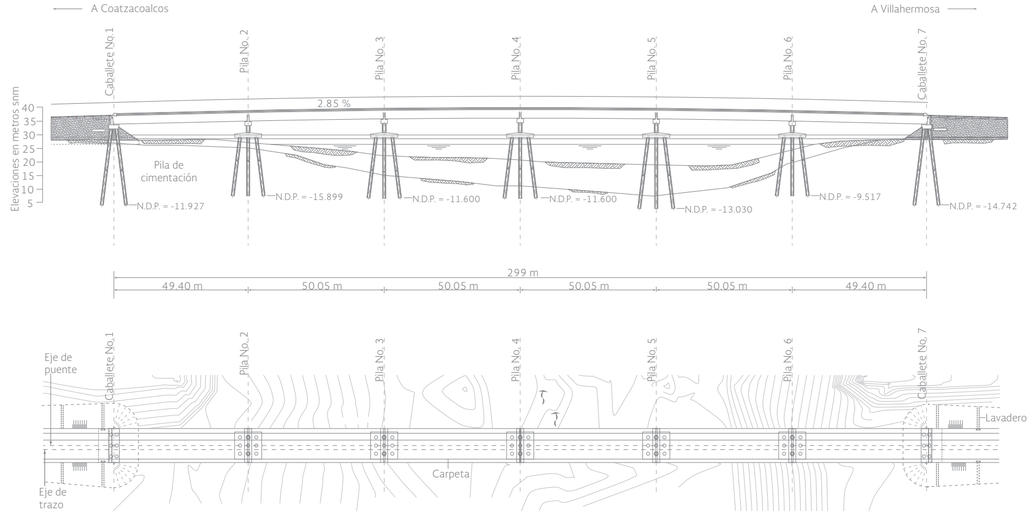
CLARO MÁXIMO: 50 m

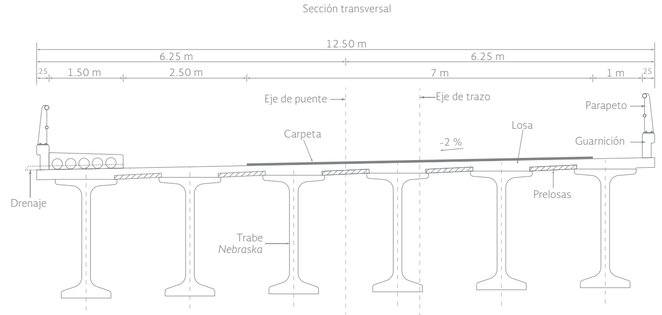
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 6.13 m

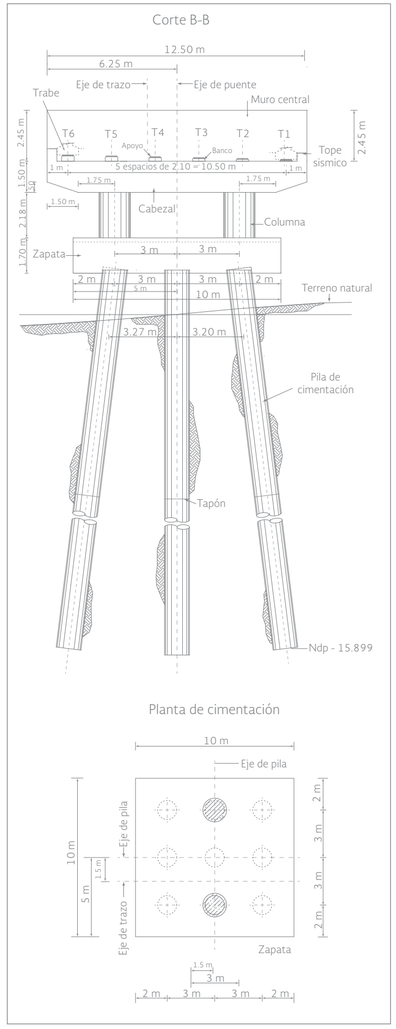
ANCHO TOTAL: 12.50 m

No. DE CARRILES: 2









Antecedentes y objetivos

Está ubicado en el estado de Tabasco sobre la carretera federal Coatzacoalcos-Villahermosa a la altura del km 41+530; cruza el río Tonalá dividiendo a los municipios de Agua Dulce, al sur de Veracruz y el de Huimanguillo, en Tabasco. En el tramo que va de Agua Dulce con dirección a Cárdenas se erigió el puente Nuevo Tonalá que sustituye a un puente previo con 400 m de longitud que se derrumbó el día 17 de julio de 2009. Tras el incidente, se dieron instrucciones de manera inmediata para la elaboración del proyecto ejecutivo de un nuevo puente que entrara en funcionamiento antes del transcurso de un año, ya que esto representaba un fuerte golpe en aspectos como el económico y vehicular, siendo una vía de comunicación de especial importancia, ya que forma parte del corredor Puebla-Progreso que beneficia a 650 000 habitantes aproximadamente de los estados de Tabasco y de Veracruz.

Estudios preliminares

Debido a la caída del antiguo puente se realizaron las pruebas necesarias para emitir el dictamen del causante, encontrando que, por sus condiciones geológicas, el terreno se había socavado, lo que derivó en la realización de una nueva cimentación con mayor profundidad, siendo ésta de 38 a 47 m, (bastante más profunda respecto de la del puente anterior) por lo que se prevé que el nuevo puente cuente con una vida útil de alrededor de 100 años.

El trazo del nuevo puente, al desplazar su eje respecto del puente anterior, permitió que la construcción se realizara a la par que se hacían los trabajos de demolición y retiro del escombro que había dejado la estructura anterior que se derrumbó.

Debido al reducido tiempo con el que se contaba para la conclusión de esta obra, tuvieron que realizarse acciones para la optimación de la logística, tales como la emisión de boletines sobre cada decisión tomada por el superintendente de obra en vez de la consulta directa y la realización de juntas para la toma de decisiones, lo que logró agilizar y ahorrar el tiempo de construcción de forma considerable, lo que se refleja en un avance de 54.05% hasta el día 23 de abril de 2010 cuando el programado para entonces era de 49.88 por ciento.

Cimentación

Esta parte del puente la componen un total de 57 pilotes hincados en el terreno a una profundidad máxima de 47 m, de los cuales 12 fueron colocados en los caballetes extremos y el resto en los dos apoyos centrales. Para la realización de la cimentación fue necesario llevar a cabo estudios adicionales para poder determinar la capacidad de carga de los pilotes mediante una prueba dinámica en un pilote de cada apoyo.

De igual forma fue necesario realizar un prueba de capacidad de carga estática. Los resultados arrojaron capacidades de carga admisible en el terreno que van desde las 367 toneladas hasta las 536 por pilote.

Los pilotes están conformados por tubos de acero estructural A-50 con 1.20 m de diámetro rellenos de concreto a lo largo de 11 m de profundidad a partir de la superficie, con una inclinación de 7° y un recorte respecto de la horizontal para recibir a las zapatas de cimentación e integrarlas al terreno.

Las zapatas de cimentación, por su parte, son de geometría cuadrangular con dimensiones de 10 m por lado con un peralte de 1.70 m, fabricadas en concreto reforzado f'c= 250 kg/cm².

Subestructura

Para la realización de la subestructura se utilizaron plataformas de madera sobre el río para poder llevar el concreto premezclado y realizar los trabajos de colado de la misma. Para los apoyos 4 y 5 fue necesaria la utilización de lanchas de gran capacidad y se utilizaron bachas para lograr trasladar desde la orilla el concreto premezclado hasta la zapata a colar. Se dispuso además de una grúa *Link Belt* para poder subir la bacha a la zona de colado. Este mismo proceso se realizó para la construcción de las columnas y los cabezales.

En la construcción de la subestructura se implementaron dobles turnos para la colocación de la obra falsa y de la cimbra y posteriormente iniciar con el armado y el colado de la zapata; después se continuó de la misma forma en la construcción de columnas y cabezales.

Sobre cada una de las zapatas de los ejes 2 al 6 se levantaron dos columnas de concreto reforzado con un diámetro de 1.50 m y altura desde los 2.18 m hasta los 3.00 m, aproximadamente; sobre éstas se construyeron los cabezales que reciben al tablero, también de concreto armado, con dimensiones de 2.60 x 12.50 m y altura igual a 1.50 m sobre los que se erige un muro central a lo largo del cuerpo con un ancho de 60 cm y un peralte de 2.45 m, cuya función es evitar el choque entre una trabe y otra en el sentido longitudinal. A los costados de éste se colocaron los seis apoyos de neopreno con resistencia *Shore-60* de 90 x 55 cm sobre los que descansan las 36 trabes tipo *Nebraska* de 49.50 m de longitud cada una que se fabricaban de manera simultánea a este proceso.

Cabe decir que la subestructura también la conforman dos caballetes a los extremos con dimensiones de 4.50 x 12.50 m y 4.50 m de altura.

Superestructura

Una vez terminada la subestructura sobre los cabezales se colocaron unas columnas provisionales, las cuales sirvieron para montar la lanzadora que permitiría realizar el montaje de trabes en cada claro –seis en total, dos de ellos de 49.40 m y cuatro más de 50.05 m de longitud, para un total de 299 metros.

La superestructura se formó con base en una losa de concreto reforzado apoyada en cada tramo sobre seis trabes tipo *Nebraska* separadas a cada 2.10 m, con dimensiones de 1.00 x 2.40 m. Posteriormente se colocaron prelosas y se realizó el armado de acero para colar la losa de 20 cm de espesor.

Una vez colada la losa, se prosiguió con la realización de las guarniciones y la colocación de los parapetos metálicos, siguiendo con la colocación de las juntas de dilatación y posteriormente el tendido de la carpeta asfáltica, para finalmente, realizar el señalamiento vertical y horizontal conforme al proyecto.

El puente cuenta con una longitud total de 299 m con un ancho de corona total de 12.50 m para alojar dos carriles de circulación, uno en cada sentido. Se eleva un total de 6.00 m respecto del nivel de aguas máximo.

Enfrente: El diseño del nuevo puente tuvo como prioridad garantizar la rapidez en su ejecución para restablecer la comunicación entre los estados del sureste y el centro de la República mexicana, luego de que el primer puente se derrumbara en julio de 2009. El uso de piezas prefabricadas en la cimentación y en la subestructura fue determinante en el avance que requirió la construcción. **Arriba:** El antiguo puente Tonalá contaba con una antigüedad de más de medio siglo y había sido diseñado con las cargas vehiculares acordes con su época. Con el paso del tiempo, la fuerte corriente del río hizo socavar el muro intermedio que lo sostenía y fue por eso que se vino abajo, lo que interrumpió por completo la circulación. Se tuvo que hacer uso provisional del puente conocido como Tonalá II –ubicado a unos metros de distancia– para atender las demandas de circulación. El sistema constructivo de lanzado de trabes fue el que se utilizó para esta estructura.

Puente Albatros
2010

EJE TRONCAL
Manzanillo-Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecandureo

AUTOPISTA
Isla de Enmedio-Isla del Cayacal

UBICACIÓN
Isla de Enmedio-Isla del Cayacal

ESTADO
Michoacán

TIPO DE PUENTE: Basculante

LONGITUD TOTAL: 514.25 m, 2500 m incluyendo los accesos

No. DE APOYOS: 15

No. DE CLAROS: 14

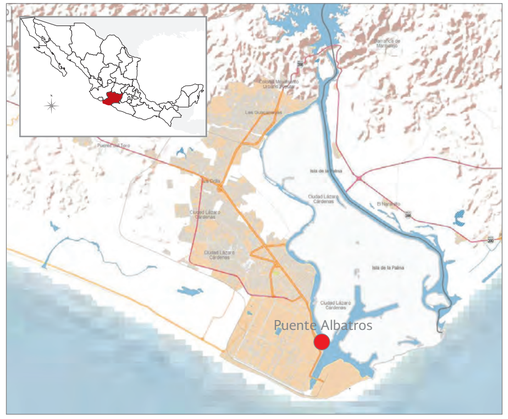
CLARO MÁXIMO: 61.70 m

ESPACIO DE APERTURA: 60 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 25 m

ANCHO TOTAL: 16 m

No. DE CARRILES: 4

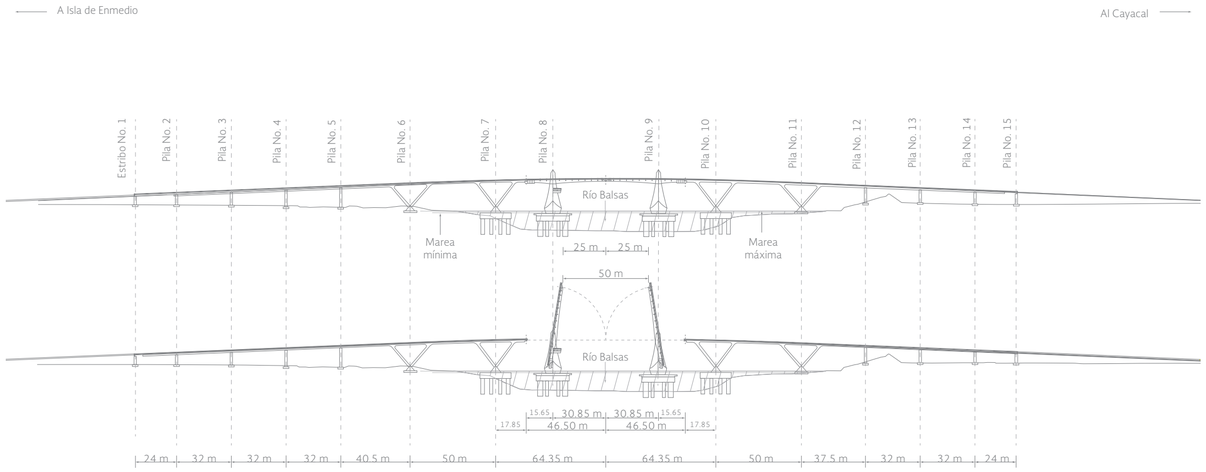


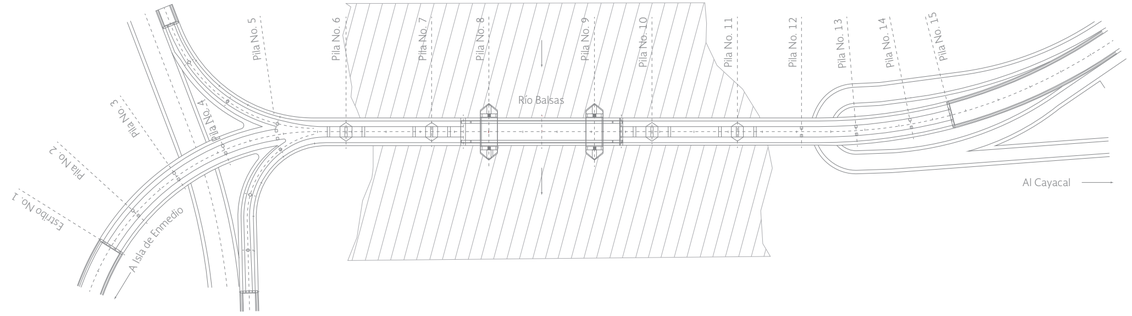
En la primera mitad de la década de los años setenta, como resultado de la construcción de una siderúrgica de instalaciones portuarias, más el crecimiento urbano de lo que actualmente se conoce como Ciudad Lázaro Cárdenas, se inició un ambicioso programa de inversión para constituir un polo de desarrollo económico sobre las costas del océano Pacífico, tomando como punto de partida la explotación de los yacimientos de mineral de hierro en Las Truchas, próximos a la desembocadura al mar del río Balsas. Al paso del tiempo y en virtud de importantes inversiones posteriores, tanto de infraestructura –por ejemplo, la presa La Villita, más la vía de ferrocarril y carreteras– como de instalaciones industriales, el puerto se ha convertido en uno de los más importantes de las costas mexicanas, por el volumen de carga que maneja y por su crecimiento, en comparación al de otras instalaciones similares.

El recinto portuario de Lázaro Cárdenas se ubica sobre dos zonas: la de la isla de Enmedio, en la margen derecha del brazo derecho del río Balsas, y la isla del Cayacal, en la margen izquierda del mismo. En la primera se encuentra una terminal de contenedores, dos de usos múltiples y otros de materias a granel, metales, minerales y fertilizantes. En la segunda está la terminal de fluidos de Pemex y la de desmantelamiento de embarcaciones entre otras, más las instalaciones de la Secretaría de Marina y un parque para pequeñas y medianas industrias. El volumen de carga manejado a través de las terminales de la isla de Enmedio constituía, a principios de la década pasada, la mayor parte del movimiento portuario; pero dado que la isla del Cayacal es más extensa y brinda condiciones más aptas para la expansión de la infraestructura portuaria, es ahí donde se han realizado en los últimos años las inversiones más importantes; por ejemplo, la Terminal Especializada para Autos y la Nueva Terminal de Contenedores.

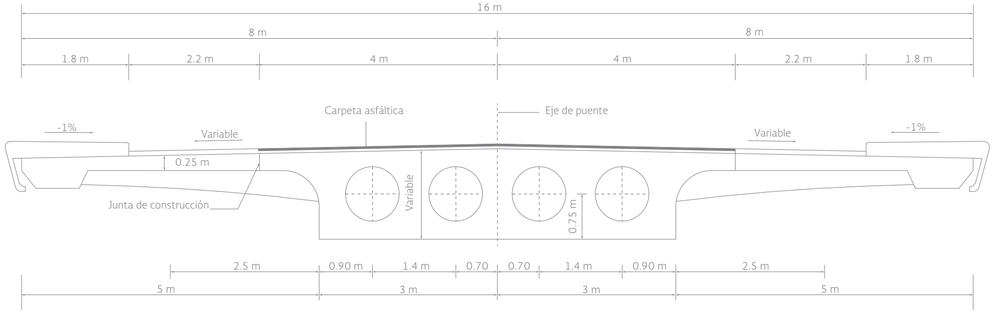
Considerando que esa expansión continuará y que el transporte de mercancías desde la isla de Enmedio hacia el interior del país se realizaba por una ruta con casi 20 km de longitud, tocando la zona urbana de Ciudad Lázaro Cárdenas, con las consecuentes complicaciones por densidad de tráfico y molestias a la población, hacia 2005 se decidió construir una vialidad para conectar las dos islas entre sí y ligarlas directamente

Arriba: Se decidió construir una vialidad que uniese la isla de Enmedio con la del Cayacal, y ligarlas directamente con la autopista que conecta la costa con el Altiplano, con la ventaja de facilitar la comunicación dentro de todo el recinto portuario, haciendo viable la consolidación de las operaciones de revisión aduanal en un punto.

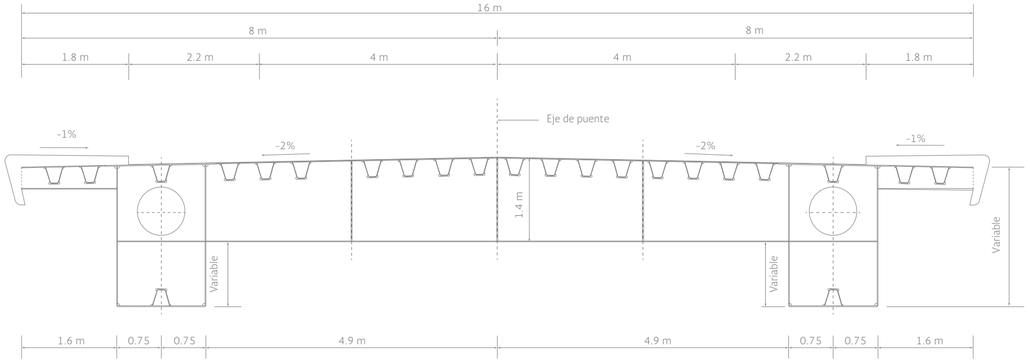




Sección transversal (puente de acceso)



Sección transversal (puente basculante)



con la autopista que conecta la costa con el Altiplano. Ventajas adicionales de esta vía son las de facilitar la comunicación dentro de todo el recinto portuario, repartido como está entre dos islas, haciendo viable la consolidación de las operaciones de revisión aduanal en un solo punto. El puente basculante Albatros es dentro de esta vialidad, el recurso que permite cruzar el cuerpo de agua que separa las islas mencionadas.

Cabe mencionar que esta obra se vincula directamente con el *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*, al *Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012* (PNI), al *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012* y al *Programa Maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Lázaro Cárdenas 2006-2011*. Específicamente, atiende dos estrategias del PNI: primero, incrementar la infraestructura portuaria, especialmente, la capacidad para el manejo de contenedores; y segundo, fomentar la competitividad del sistema portuario ofreciendo servicios conforme a los estándares nacionales e internacionales. En última instancia, se pretende orientar el desarrollo y crecimiento del puerto como un nodo de transporte esencial en el comercio nacional e internacional, generando beneficios a la economía de la región, entre ellos, el establecimiento de nuevas empresas y el desarrollo portuario de Lázaro Cárdenas.

Arriba: El tramo central de la estructura, el cual corre recto para salvar el cauce del río, se extiende entre los apoyos 5 y 12. Por su parte, el diseño estructural de los tableros se resolvió mediante dos vigas longitudinales de acero, acostilladas transversalmente para dar rigidez al conjunto. **Enfrente arriba:** En la isla del Cayacal se generó una vialidad de retorno que permite el paso de vehículos por debajo del puente. Además, los provenientes de la isla del Cayacal pueden desviarse hacia la zona urbana en lugar de ir a las instalaciones portuarias en la Isla de Enmedio. **Enfrente abajo:** Los vehículos que corren sobre la avenida Lázaro Cárdenas, en la isla de Enmedio, en cualquiera de las direcciones, pueden incorporarse al puente. Las curvas para las vialidades se trazaron considerando dos velocidades máximas de operación: 70km/h para la circulación principal entre instalaciones portuarias y 30km/h para las restantes.

Estudios preliminares

Preliminarmente se estudiaron tres alternativas de solución estructural para el claro que salvaría el canal: puente atirantado, puente en doble voladizo y puente basculante. Considerando que cualquiera que fuere elegido, el puente debía dejar libre un claro vertical de 53 m para la circulación de embarcaciones. Resulta evidente que la ventaja del puente basculante consistía en permitir un considerable acortamiento de las rampas de aproximación, pues es posible situar la calzada de rodamiento a una altura media tal, que permita el paso de la mayoría de las embarcaciones; mientras que el claro central, susceptible de abrirse, permite el paso excepcional de embarcaciones mayores, sin imponer ninguna limitación a su altura. A la postre, la Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, (el organismo que en este caso actuaba como solicitante de la obra) se inclinó por el puente basculante, tomando en cuenta que ofrecía las mejores ventajas operativas y condiciones técnicas. Dato importante en esta opción es que el lapso de operación de los tramos basculantes –aquél que transcurre desde que se interrumpe la circulación de vehículos hasta el punto de rotación máxima– se especificó en sólo tres minutos. Fue en esta fase que se tomó la decisión de dar a la obra el nombre que lleva, en referencia a las aves marinas de la región, que se distinguen por la gran envergadura de sus alas.

Adicionalmente, se realizaron estudios hidrológicos, geológicos, de riesgo sísmico y de incidencia de viento, cuyas conclusiones se emplearon como punto de partida para el diseño estructural ejecutivo del puente.

Características de vialidad

Se especificó una vialidad principal de 16 m de ancho, para vehículos del tipo T3-S2-R4. Si bien en los estudios preliminares se consideró la posibilidad de operar el puente con sólo dos carriles, uno para cada sentido de circulación y un carril central para rebase más acotamientos; a la postre se optó por suprimir a estos últimos y operar el puente con cuatro carriles, dos en cada sentido. Además de la calzada principal, que canaliza el tránsito desde y hacia las instalaciones portuarias entre las dos islas, en la isla de Enmedio se dispuso un entronque con la avenida Lázaro Cárdenas, la cual corre a lo largo de la margen izquierda del canal, comunicando las instalaciones portuarias al sur con la zona urbana al norte. Gracias a este entronque vial, los vehículos que corren sobre dicha avenida en cualquiera de las direcciones pueden incorporarse al puente, y los provenientes de la isla del Cayacal pueden desviarse hacia la zona urbana en lugar de ir a las instalaciones portuarias en la isla de Enmedio. Por último, se dispuso una vialidad de retorno, que en la isla del Cayacal permite el paso vehicular por debajo del puente, para dar servicio a una instalación de manejo de granos.

Las curvas se trazaron considerando dos velocidades máximas de operación: 70 km/h para la circulación principal entre instalaciones portuarias y 30 km/h para las restantes. La pendiente de la vialidad principal es de 4% En la rampa de descenso que lleva del puente hacia las instalaciones portuarias de la isla de Enmedio, aumenta hasta 5 por ciento.

Apoyos y superestructura

El puente consta de quince apoyos: ocho en la isla de Enmedio y siete en la del Cayacal, todos realizados con concreto armado. Los apoyos 1 a 5 y 12 a 15 son pilas verticales. Se debe mencionar que el proyecto incluye otras cinco pilas verticales más, las cuales cargan con los ramales del entronque vial en la ribera de la isla de Enmedio. El tramo central de la estructura, que corre recto para salvar el cauce del río, se extiende entre los apoyos 5 y 12, los cuales presentan una distribución simétrica. Cuatro de éstos (6, 7, 10 y 11) adoptan la forma de una V. Los apoyos 8 y 9 sirven como estribos para el claro central, compuesto por los dos tramos basculantes.

Durante la fase de diseño se consideraron dos alternativas para resolver el conjunto de pilas y superestructura. En la alternativa 1, la sección de la calzada constaría de dos cajones paralelos, apoyados sobre pilas gemelas. La alternativa 2 proponía un cajón único central, cuyo peralte sería más reducido en comparación al de la alternativa anterior, aunque los vuelos serían más extendidos, a fin de mantener el ancho de la calzada de rodamiento especificada. Esta segunda alternativa fue la elegida, pues la forma plana de las pilas ofrece una mayor rigidez estructural en un sentido transversal al eje del puente.

El método constructivo empleado fue el de colado continuo de la losa, aplicando presfuerzo en los sentidos transversal y longitudinal. Se acudió a una tecnología novedosa de concreto autocurante mediante agregados, que permite disminuir los tiempos de ejecución al proporcionar una mezcla con mejor consistencia y mayor facilidad de manejo, cuyo curado se realiza sin necesidad de tomar providencias adicionales. Proporciona además otras ventajas: dota al material con una microestructura más densa, elimina el fisuramiento por contracción plástica, disminuye la contracción a largo plazo y reduce los costos de ejecución.

Para el tramo central, el diseño estructural de los tableros se resolvió mediante dos vigas longitudinales de acero, acostilladas transversalmente para dar rigidez al conjunto.

Resulta necesario destacar el cuidado puesto al diseñar la forma y aspecto de los estribos y los tableros basculantes. Dichos estribos, en forma de horquilla, son grandes estructuras de concreto armado que sobresalen 25 m sobre el nivel medio del agua, unos 6 m por encima de la superficie de rodamiento. A efecto de atenuar visualmente su gran dimensión, la sección horizontal de los postes verticales de las horquillas no es constante ni rectangular, sino que adopta vagamente la forma de un pentágono cuya superficie disminuye desde abajo hacia arriba. Gracias al cuidado puesto al definir estas geometrías, los postes evocan la forma puntiaguda que tiene la proa de un buque; aunque su aspecto también remite al de un obelisco, con su característica terminación en punta. En cuanto a los tableros, la sección de las vigas longitudinales también disminuye desde el punto de rotación hacia cada uno de los extremos. La forma del puente, visto a la distancia, llama la atención por su elegancia.

Unidades de transmisión de choques

Un aspecto particularmente interesante del diseño estructural antisísmico consistió en dotar al puente de unos dispositivos que visualmente asemejan grandes amortiguadores, a los que se conoce como unidades de transmisión de choque. Su función es doble. Por un lado, permiten cierta movilidad de la superestructura a fin de que ocurran las dilataciones y contracciones causadas por los cambios térmicos del clima y el ciclo noche-día. Por el otro, al ocurrir un movimiento telúrico, inmovilizan la estructura y controlan las solicitaciones dinámicas. Estas unidades, 26 en total, se dispusieron en los extremos de las calzadas de aproximación al claro central por ambas márgenes, a las que sirven como amarres sísmicos.

Sistema basculante

El atributo distintivo de este puente está en la posibilidad que ofrece de abrir el claro central de la calzada de rodamiento, lo cual despeja un espacio de 60 m de ancho para el paso de navíos, cuya manga máxima es de 24 m, de acuerdo con las especificaciones de seguridad de la Armada de México. Para tal efecto, dicho claro está formado por dos tableros montados respectivamente sobre pivotes, con el eje de rotación dispuesto transversalmente al sentido en el que corre la calzada. El punto de rotación de los tableros se sitúa aproximadamente a un tercio de la longitud total, que en términos estructurales constituyen un elemento en doble voladizo, con un tramo corto y otro largo. Cuando se requiere abrir el paso a un navío, un mecanismo hace girar los tableros y se aprovecha el peso del tramo corto como contrapeso para el izamiento del tramo largo. Es en virtud de esta función de contrapeso propia

de las básculas que se conoce a las estructuras de este tipo como "basculantes".

Desde su posición horizontal de operación regular para el paso de vehículos, cada tablero puede girar hasta una posición erguida, en la que el plano de rodamiento forma un ángulo de casi 90° respecto de la superficie del agua. En principio los dos tableros son idénticos; pero tienen ciertas diferencias: al estar en posición horizontal y los vehículos transitan por la calzada, la condición estructural es que el tablero de la margen derecha descansa sobre el de la margen opuesta, que para dicho efecto cuenta con un par de prolongaciones de sus vigas longitudinales.

Consecuentemente, cuando arranca el proceso de izamiento para abrir paso a las embarcaciones, este tablero es el primero en moverse; cuando concluye el proceso de cierre, es el que lo termina. La cabina desde donde se controlan las operaciones está montada aguas abajo, a media altura del estribo de la margen derecha del río.

El diseño y fabricación del mecanismo para operar los tableros se confió a una empresa alemana especializada en estructuras metálicas para infraestructura hidráulica. En sólo cinco meses se cumplió la encomienda, suministrando *in situ* todos los elementos y equipos necesarios.

Enfrente: El atributo distintivo de este puente es que ofrece la posibilidad de abrir el claro central de la calzada, con lo que se despeja un espacio de 60 m de ancho para dar paso a los navíos. Dicho claro está formado por dos tableros montados respectivamente sobre pivotes con el eje de rotación dispuesto transversalmente al sentido en el que corre la calzada. **Arriba:** El punto de rotación de los tableros se sitúa aproximadamente a un tercio de la longitud total del mismo. Cuando se requiere dar el paso a un navío el mecanismo hace girar los tableros y se aprovecha el peso del tramo corto como contrapeso para el izamiento del tramo largo.

Puente Magiscatzin
2011

EJE TRONCAL
Veracruz-Monterrey
con ramales a Matamoros

AUTOPISTA
Tampico-Ciudad Mante

UBICACIÓN
Ciudad Mante-González
Km 124+750

ESTADO
Tamaulipas

TIPO DE PUENTE: Arco atirantado

LONGITUD TOTAL: 224 m

No. DE APOYOS: 4

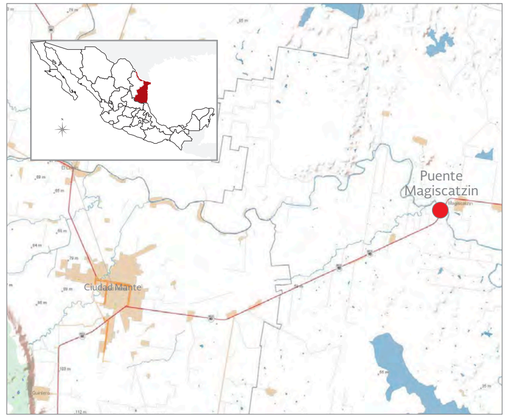
No. DE CLAROS: 3

CLARO MÁXIMO: 104 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 15.48 m

ANCHO TOTAL: 14.08 m

No. DE CARRILES: 3



Este puente se ubica dentro de la zona sur del estado de Tamaulipas, en el municipio de González, específicamente en el km 124+750 de la carretera Tampico-Ciudad Mante, subtramo Ciudad Mante-González, y cruza el río Guayalejo.

La construcción de un nuevo cuerpo del actual puente Magizcatzin formó parte de la estrategia de modernización de la infraestructura vial de la zona sur del estado, dotando a los usuarios de una infraestructura vial más segura y con una estructura geométrica definida basada en un diseño adecuado.

Antecedentes y objetivos

Era necesario modernizar la vía para tránsito vehicular que conectaría con las principales carreteras de la zona norte del país, dirigidas hacia la frontera con Estados Unidos, disminuyendo así el tiempo de recorrido y por ende, el índice de accidentes y costos de mantenimiento de los equipos de transporte.

Esta estrategia de modernización del sistema carretero de Tamaulipas mejoró las condiciones de comunicación con la zona centro del país y la frontera con los Estados Unidos Mexicanos, beneficiando los sectores comercial, industrial y turístico.

La calidad paisajística del área no se vio afectada por el desarrollo del proyecto ni existió una degradación de la misma durante la construcción y en la actualidad, en la operación del puente.

Estudios preliminares

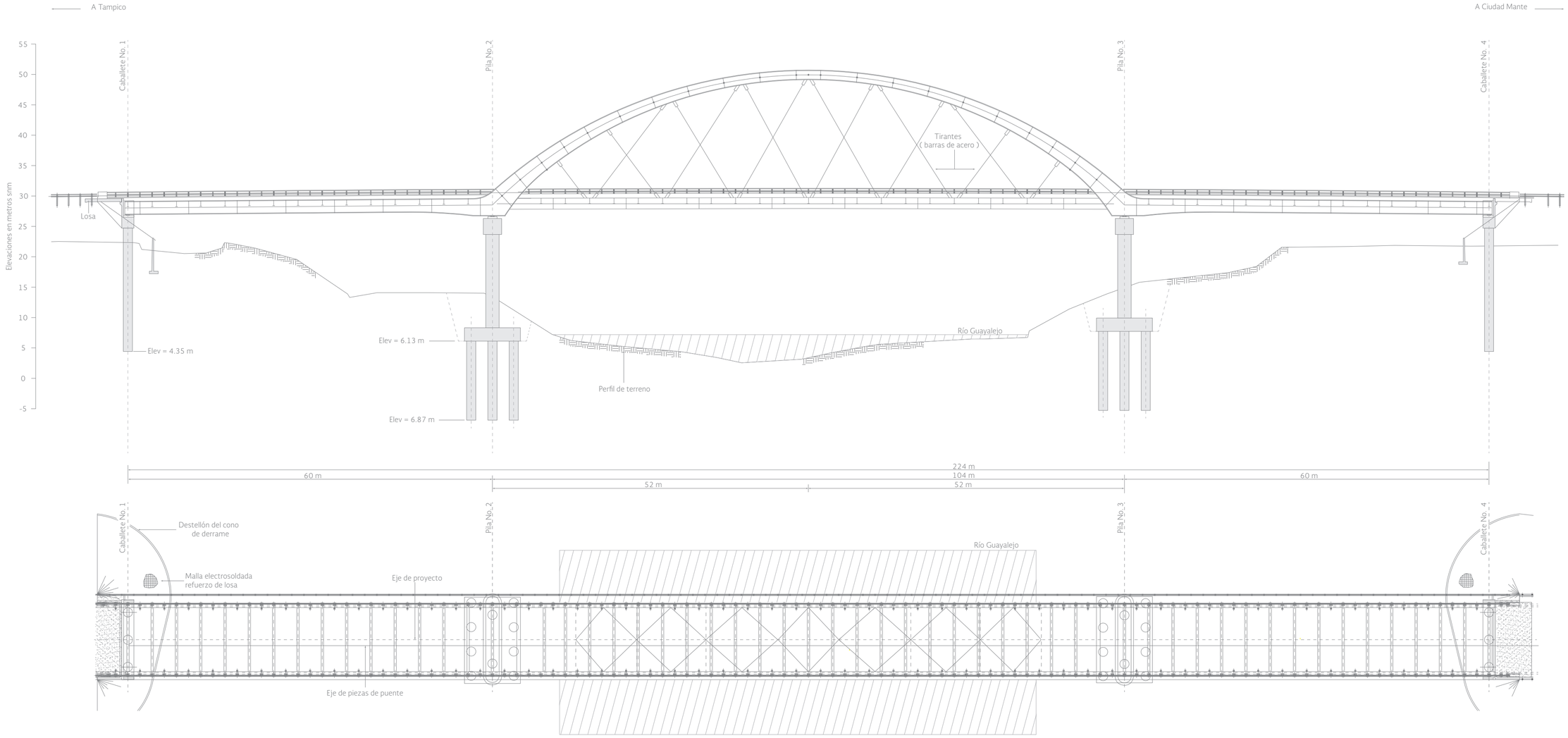
Se realizaron estudios de impacto ambiental, los cuales fueron identificados en su mayor parte como no relevantes y de carácter puntual, local, mitigables y permanentes.

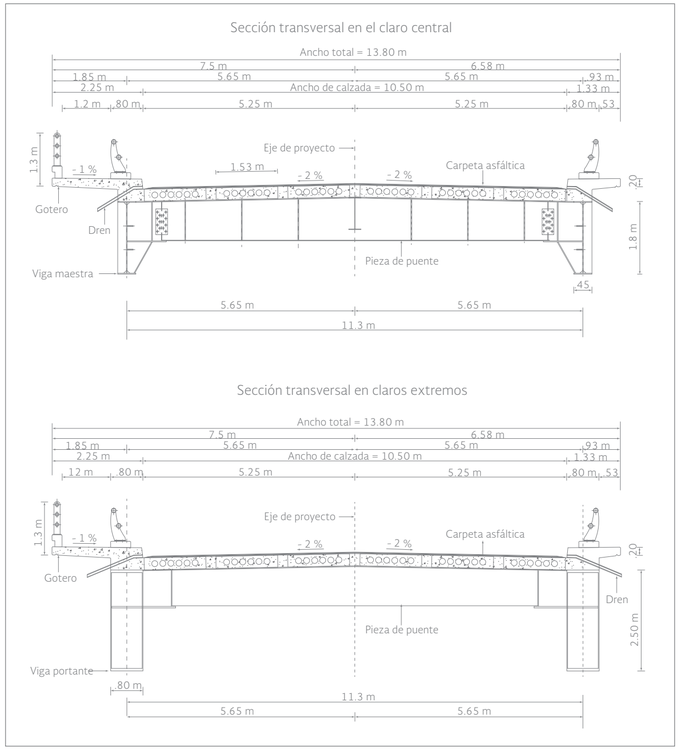
Para la realización de sondeos se utilizaron barrenas espirales y brocas tricónicas. El muestreo se efectuó en forma alterada con tubo partido, el cual consiste en hincar con golpes, una cuchara muestreadora de 60 cm de largo y 5.08 cm de diámetro exterior y 3.49 cm de diámetro interior, mediante la energía proporcionada por una masa de 64 kg de peso que es dejada caer libremente de una altura de 75 centímetros.

Estos sondeos arrojaron que la estratigrafía del terreno está formada en su mayoría por depósitos de arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad.

En la exploración realizada se encontró una capa vegetal con arcilla de color negro hasta una profundidad de 1.00 m; de 1.00 a 2.60 m se detectó un material fino de color café; bajo esta capa y hasta la profundidad de 5.60 m aparece un estrato de material fino de color crema. A estos materiales les subyace un estrato de grava-arena con limo de color gris oscuro desde

Izquierda: El primer puente Magizcatzin fue proyectado en 1941. Fue considerado uno de los más avanzados por contar con un claro central de 104 m. En ese entonces, entre los ingenieros se decía que se habían construido dos puentes dado que el primero fue obra falsa piloteada sobre la que se montaron las armaduras, para continuar con el puente final. **Derecha:** En el actual puente, una vez colocados los pilotes de la cimentación, se construyeron simultáneamente las pilas de ambos lados del río, para proseguir con la construcción de los estribos. La forma del puente hace que se adapte perfectamente al entorno montañoso. Cabe decir que durante el proceso constructivo se tuvo especial cuidado en evitar un impacto ambiental en la zona.


A Tampico
A Ciudad Mante
Elevaciones en metros snm
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
Caballete No. 1
Pila No. 2
Pila No. 3
Caballete No. 4
Tirantes
(barras de acero)
Losa
Elev = 4.35 m
Elev = 6.13 m
Elev = 6.87 m
Río Guayalejo
Perfil de terreno
224 m
60 m
104 m
52 m
52 m
60 m
Destellón del cono
de derrame
Malla electrosoldada
refuerzo de losa
Eje de proyecto
Eje de piezas de puente



6.00 hasta 10.00 m de profundidad; luego aparece lutita gris oscura fracturada, la cual se detectó hasta la profundidad máxima explorada, con una resistencia de más de 60 golpes.

Procedimiento constructivo

Se inició la preparación del terreno para comenzar la primera etapa del proyecto; se hicieron las perforaciones para alojar los pilotes y asimismo las excavaciones para las zapatas, para posteriormente construir las dos pilas y los dos estribos, preparando así los accesos y plataformas donde se colocaron las grúas para el izado de las piezas de la superestructura. Se colocaron apoyos provisionales (torres) para el montaje de dovelas en el arco, el cual se hizo en tres etapas, fueron colocada en su posición correspondiente hasta llegar a las dovelas de cierre para después instalar los contravientos que unen la estructura paso a través. En una segunda etapa se llevó a cabo la colocación de las vigas portantes por etapas y sus piezas puente correspondientes. Los tirantes (barras de acero) tensores se instalaron simultáneamente para recibir las vigas.

Posteriormente se colocaron las prelosas en el tablero central, los drenes y la preparación para guarnición y parapetos, para concluir con el colado de liga entre prelosas y vigas metálicas. Finalmente, se retiraron los apoyos provisionales para el colado de banquetas, guarnición y parapetos y la colocación de la carpeta asfáltica.

Cimentación

El procedimiento constructivo comenzó con la cimentación de los apoyos, los cuales fueron solucionados con pilotes de punta de concreto reforzado de 1.50 m de diámetro, colocados en el lugar dentro de una perforación previa, a una profundidad mínima de 13 m y a una máxima de 21 metros.

En total la cimentación cuenta con 28 pilotes, 11 pilotes en cada zapata y 3 en cada estribo. La dimensión de las zapatas es de 9.20 x 14.20 m por 2.20 m de altura y son de concreto reforzado con f'c=300 kg/cm².

Subestructura

Está hecha con base en dos pilas de concreto reforzado con una sección ovalada de 14.20 x 2.20 m y una altura 15.48 m. Ambas pilas cuentan con cabezales de sección ovalada de 3.00 x 15.00 m, con un peralte de 2.50 metros.

Cuenta con estribos de 13.16 x 2.00 m por 5.10 m de altura (2 m de altura libre y 3.10 m para recibir al tablero), apoyados sobre dos pilotes de 1.50 m de diámetro que reciben una carga de 482 toneladas cada uno, desplantados a una profundidad de 20.40 metros. Todos los elementos descritos anteriormente tienen una resistencia del concreto de 300 kg/cm². Las pilas y los estribos cuentan con apoyos especiales tipo *Tetron*.

Superestructura

El puente tiene una longitud total de 224 m. Está formado por tres claros: dos laterales de 60 m y el principal de 104 m. La altura máxima de la estructura paso a través es de 21.10 m. El ancho total del puente es de 13.80 m con un ancho de calzada de 10.20 m, 30 cm de espesor de losa y 4 cm de carpeta asfáltica para alojar tres carriles de circulación.

El claro central está resuelto con un sistema de arcos y tirantes que reciben un tablero a base de vigas portantes y piezas puente. El sistema de piso se construyó mediante prelosas de concreto reforzado.

Las vigas portantes o maestras tienen un peralte de 1.80 m con un patín de 45 cm y 12.00 m de largo. Las piezas puente se encuentran a cada 4 m ubicadas transversalmente; con un peralte de 1.03 m, 9.56 m de longitud y un patín de 30 centímetros.

Las dovelas de los arcos son metálicas de sección cajón y tienen 3.96 m de peralte en su sección más ancha y 1.60 m en la dovela de cierre; éstas están unidas por vigas de contraventeo en la parte superior del puente a cada 6 m. Los tirantes de la estructura son de 40 mm de diámetro fu=132 t a la ruptura.

Como sistema anticorrosivo, a toda la estructura metálica le fue aplicado un chorro de arena a metal blanco como limpieza, un primario anticorrosivo inorgánico de zinc RP -4 a 2.5–3.0 milésimas de pulgada, para después aplicar un enlace epóxico a 5 milésimas de pulgada y finalmente un acabado de poliuretano color verde a 2 milésimas de pulgada.

En toda la estructura metálica se utilizó acero estructural ASTM A 572 grado 50. Los procedimientos de fabricación, verificación de la calidad así como el personal involucrado en todos los procesos se apegaron a lo indicado en el código de soldadura para puentes *Bridge Welding Code* de la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society) y a la AASHTO (American Association of State Highway and Trasportation Officials).

Izquierda: El izado y colocación de las dovelas del arco principal fue un procedimiento que se llevó a cabo simétricamente, utilizando dos apoyos intermedios para sostener las dovelas durante la construcción del arco principal. Una vez terminado se instalaron los contravientos que unen la estructura. **Derecha:** La estructura de los apoyos intermedios no está en el caudal del río, lo que facilitó el izaje de dovelas con las grúas. Posteriormente, fueron colocadas las vigas madre para la sección del tablero principal, para así proceder con la construcción del tablero de la superestructura.

Puente Pueblo Nuevo
2011

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Santa Lucía
Km 132+950

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 322 m

No. DE APOYOS: 5

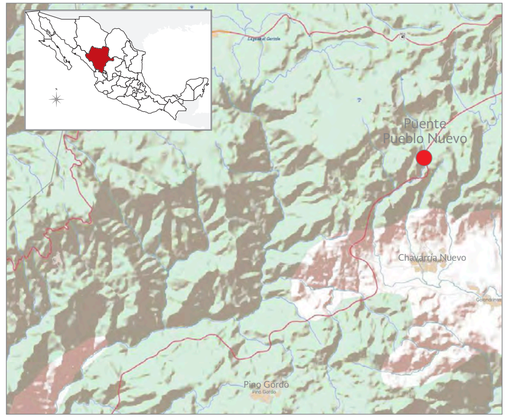
No. DE CLAROS: 4

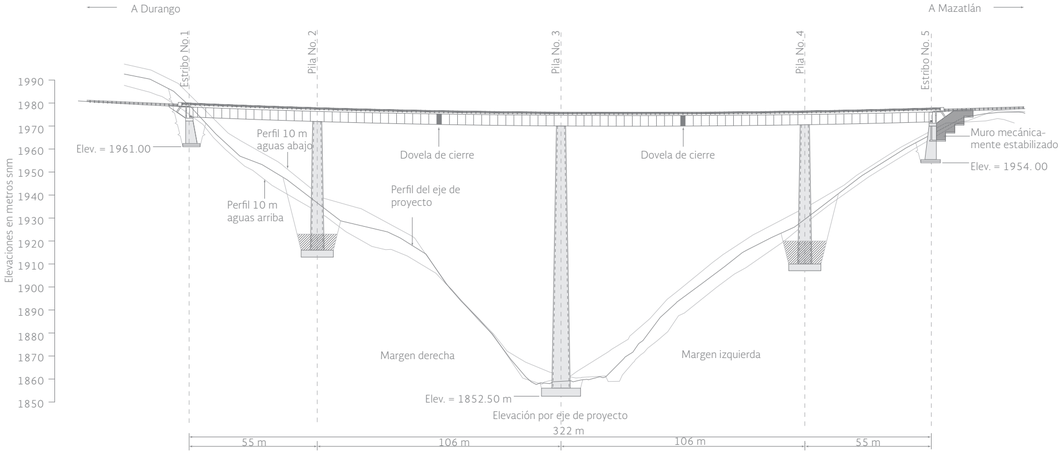
CLARO MÁXIMO: 106 m

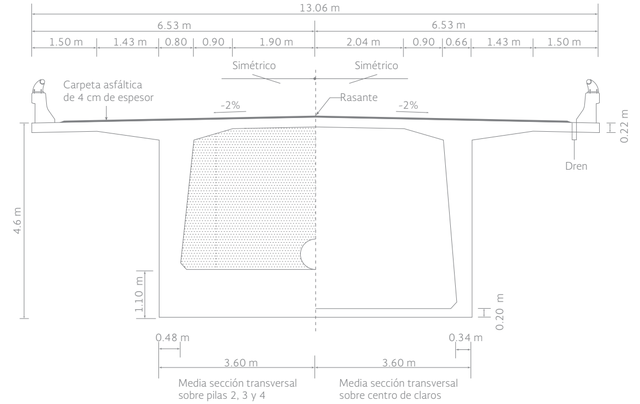
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 122.11 m

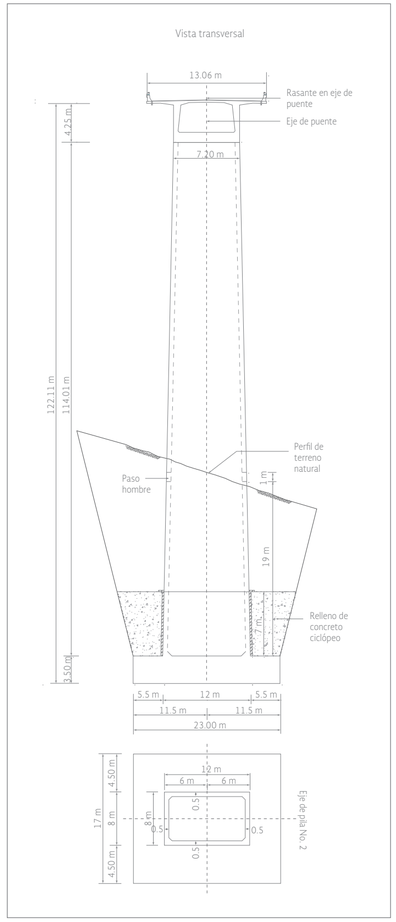
ANCHO TOTAL: 13.06 m

No. DE CARRILES: 4









El puente está apoyado en tres pilas de concreto reforzado, con una resistencia de 300kg/cm². Fue construido mediante la técnica de doble voladizo, en donde cada uno está formado por 14 dovelas, dando como resultado un total de 84 dovelas de concreto reforzado con una resistencia de 350kg/cm².

El puente fue construido en el sureste del estado de Durango, en una zona elevada de la Sierra Madre Occidental, dentro del municipio de Pueblo Nuevo. Se encuentra en el tramo El Salto-Santa Lucía, en el km 132+950 de la autopista Durango-Mazatlán, considerada la más compleja y moderna del país.

El puente es recto, sin esviaje; tiene un ancho total de 13.06 m y un ancho de calzada de 12 m. Se utiliza para cuatro carriles de circulación que cruzan una barranca con una profundidad máxima de 122.15 metros.

Este puente atraviesa el río San Diego, agilizando la comunicación entre la zona indígena y la parte baja del municipio; así se ahorran hasta cuatro horas de viaje por lo que las actividades de comercio, ganadería y agricultura se ven favorecidas con una mayor eficacia.

Estudios preliminares

Para el estudio geotécnico se llevó a cabo la exploración del subsuelo en el sitio y se ejecutaron sondeos distribuidos en los sitios probables donde quedaron los apoyos del puente ubicados sobre el eje de proyecto del camino.

Se realizaron ocho sondeos con máquina rotatoria utilizando para su avance la prueba de penetración estándar en suelos arenosos y areno-limosos. Cuando se encontró roca o boleos, se empleó un barril muestreador con broca y rima de diamante para obtener núcleos de roca, a los cuales se les realizaron pruebas de peso volumétrico en estado natural y compresión no confinada. La profundidad de los sondeos se definió de acuerdo con las características estratigráficas del sitio.

Con base en las condiciones topográficas y estratigráficas del sitio, así como en los análisis efectuados, se concluyó que la cimentación de la obra sería de tipo superficial consistente en zapatas de concreto reforzado.

Se realizó también un estudio topohidráulico para el cual se hizo un levantamiento de 100 m, aguas arriba y 100 m aguas debajo de la intersección del cruce con la corriente, medidos sobre la poligonal de apoyo.

Partiendo de los datos de trazo contenido en los planos de kilometraje se procedió a su localización en campo, para iniciar con el re-trazo y nivelación del eje de la autopista. Después se efectuó el levantamiento del perfil del eje de la carretera y el seccionamiento, a fin de calcular y dibujar en gabinete los diferentes planos de perfiles y la configuración de la planta topográfica.

Cimentación

Las pilas que sostienen al puente están desplantadas sobre zapatas de concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm². La sección varía de 14.5 x 16.5 m sobre la pila No. 2 y de 23.00 x 17.00 sobre la pila No. 3, que es la mayor. Con un peralte de 3 m y de

3.50 m. Los extremos del puente están apoyados en dos caballetes a su vez soportados por contrafuertes y zapatas de cimentación.

Sobre cada uno de los caballetes se colocaron dos apoyos tipo *Tetron* CD/GG multidireccionales, con capacidad vertical de 300 kN, rotación admisible de 0.01 radianes y espesor de 12.2 cm. Estos dispositivos sirven de apoyo al último segmento de los voladizos.

Subestructura

Se soporta en tres pilas de concreto reforzado con una resistencia de 300 kg/cm². Las pilas son de sección hueca y variable con la altura; la pila 2 tiene una altura de 63.57 m, la pila 3 es la más alta con una altura de 122.11 m y la pila 4 tiene una altura de 63.55 metros.

Superestructura

Está formada por cuatro claros, dos con una longitud individual de 55 m y los otros dos de 106 m cada uno, lo que da una longitud total de 322 m. La superestructura se construyó mediante una técnica de doble voladizo, colocando dos voladizos simultáneamente a partir de cada pila, cada uno formado por 14 dovelas, lo que hace un total de 84 dovelas.

Las dovelas son de concreto reforzado con una resistencia de 350 kg/cm². Después fueron postensadas con torones de presfuerzo para dar continuidad entre una dovela y otra. Los diámetros de los torones fueron de 1.3 y 1.5 cm y quedaron protegidos con ductos de plástico en toda su longitud. Las dovelas son de sección hueca, tipo cajón; tienen un área de 8.9 m² y una longitud de 3.5 m en promedio. El peralte de las dovelas es de 4.6 m y se mantiene constante en toda la longitud de la superestructura. Sobre las pilas y los estribos se colocaron diafragmas con una resistencia de 3 kg/cm², los cuales permiten la conexión entre pila y dovela. Sobre las dovelas de concreto se tendió una capa de asfalto de 4 cm de espesor.

El peralte de las dovelas es de 4.6 m. Se mantiene constante en toda la longitud de la superestructura. Por otro lado, sobre las pilas y los estribos se colocaron diafragmas con una resistencia de 300 kg/cm². Los extremos del puente están apoyados en estribos de caballetes, que a su vez están soportados por contrafuertes y zapatas de cimentación.

Puente Paso de Piedra
2011

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Santa Lucía
Km 134+600

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 224 m

No. DE APOYOS: 4

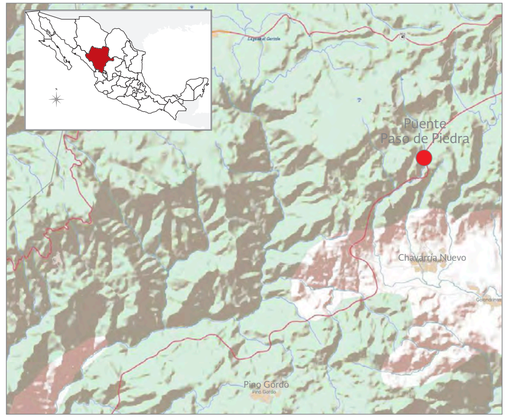
No. DE CLAROS: 3

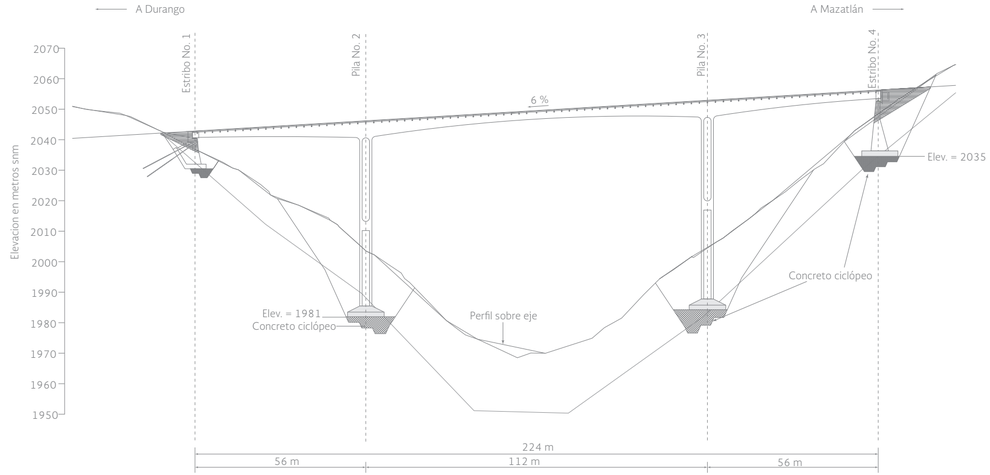
CLARO MÁXIMO: 112 m

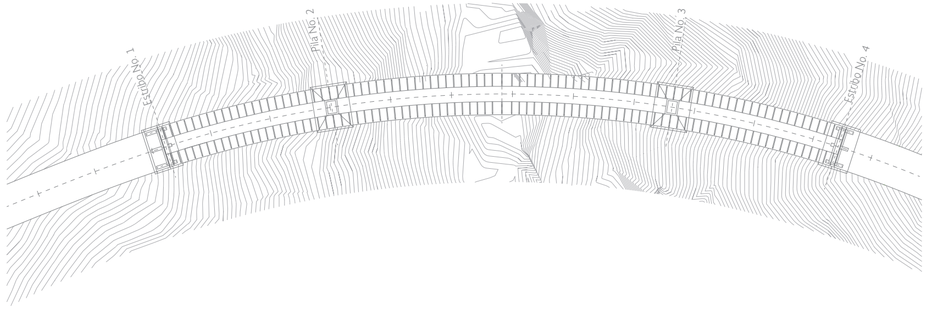
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 87.06 m

ANCHO TOTAL: 13.66 m

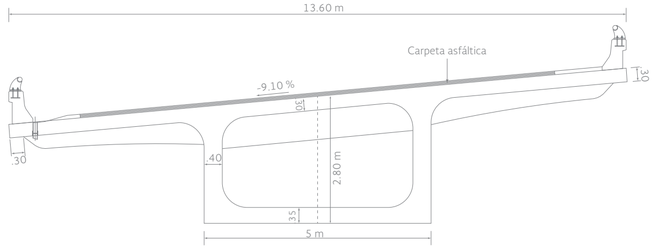
No. DE CARRILES: 4

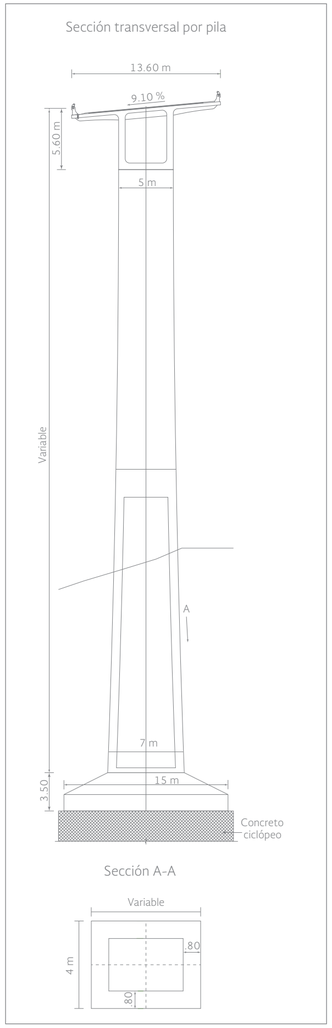






Sección transversal por centro de claro





Este puente es de los primeros que empezaron a construirse en la autopista Durango-Mazatlán, tramo con el que se concluye el eje carretero Mazatlán-Matamoros. Su presencia reviste gran importancia en términos de vías de comunicación estatal y municipal, pues junto a los puentes vecinos como Pueblo Nuevo, Leoneras y El Magueyal que se encuentran en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, otorgan mejores posibilidades de intercambio comercial a cerca de 50 000 habitantes, que pueden transportar de forma más eficiente productos como maíz, avena forrajera, leche, así como carne de ganado bovino y porcino, que se producen en la zona.

Cimentación

El puente Paso de Piedra cuenta con un total de cuatro apoyos, de los cuales dos se tratan de estribos en los extremos que se encuentran anclados al terreno. En cuanto a los otros 2 apoyos, son pilas que descansan sobre zapatas aisladas de concreto reforzado con una sección rectangular de dimensión igual a 12x15 m y una altura total de 3.50 m en cada una de ellas.

Subestructura

Las pilas que soportan la superestructura poseen una forma rectangular hueca, son uniformes con una sección de arranque mayor y una sección de cierre reducida lo cual le da un perfil de geometría trapezoidal. Sus dimensiones son de 4x15 m con una altura de pila máxima de 87.06 metros.

El espesor de pared de estas secciones es uniforme e igual a 80 centímetros. Todos los elementos están fabricados en concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm².

Superestructura

La superestructura cuenta con una longitud total de 224 m salvando dos claros laterales de 56 m y un claro mayor al centro con un total de 112 m. El ancho total es de 13.66 m. Presenta una pendiente longitudinal de 6% y 9.10 % para la pendiente transversal. El tablero se encuentra recubierto por 8 cm de carpeta asfáltica como superficie de rodamiento.

El sistema constructivo elegido para la realización de este puente es por incrementos sucesivos, también conocido como doble voladizo. De tal manera que fue fabricado con ayuda de dos carros de colado para el armado y colado de dovelas de altura variable en toda la longitud del puente, hechas a base de concreto reforzado, con un ancho aproximado de 2.50 m, siendo éste mayor en las dovelas sobre pila y las dovelas de cierre. La altura mínima de estas piezas fue de 2.80 m y de 5.60 m para las piezas más peraltadas con un espesor de pared que oscila entre los 35 y los 60 centímetros.

Enfrente: Las pilas que soportan la estructura son de sección rectangular hueca. En el remate de los apoyos se encuentran los cabezales sobre los que se apoya la superestructura. Todos estos elementos fueron fabricados con concreto reforzado, con una resistencia de 250 kg/cm². **Arriba:** La superestructura está formada por una losa montada sobre un sistema de trabes de concreto presforzado, apoyadas sobre cajones. Después de haber realizado los trabajos de montaje de trabes, se realizó el colado de liga que unifica la superestructura con los cabezales.

Puente El Nuevo
2011

EJE TRONCAL
Manzanillo-Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo

AUTOPISTA
Guadalajara-Colima

UBICACIÓN
Guadalajara-Colima
Km 111+040

ESTADO
Jalisco

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 145.40 m

No. DE APOYOS: 3

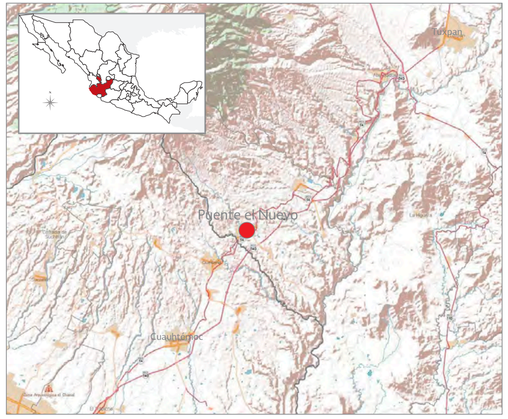
No. DE CLAROS: 2

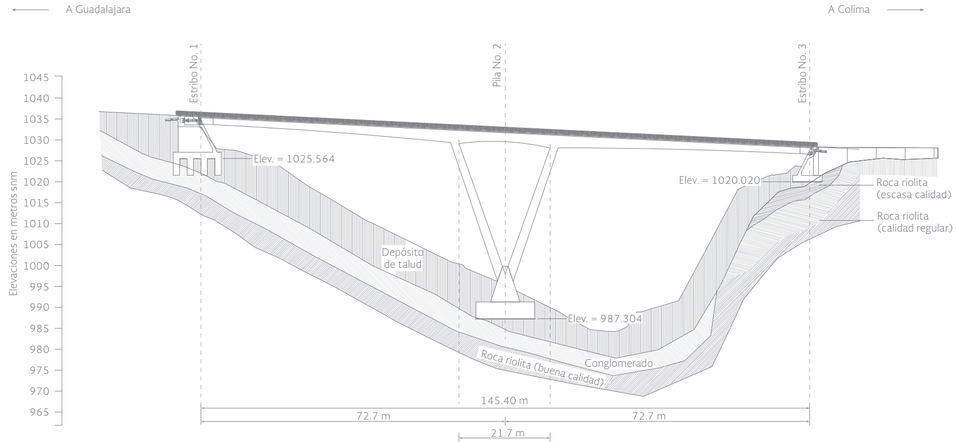
CLARO MÁXIMO: 72.70 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 30 m

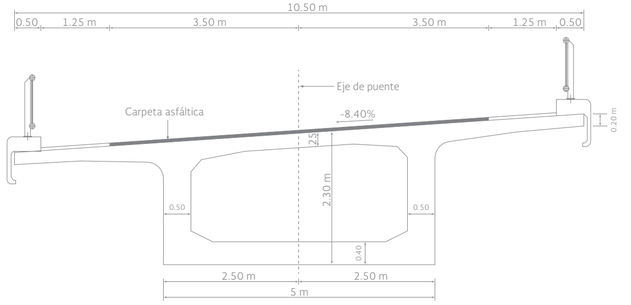
ANCHO TOTAL: 10.50 m

No. DE CARRILES: 2





Sección transversal por centro de claro



Izquierda: El proyecto surgió con el propósito de modernizar la autopista Guadalajara-Colima, por lo que fue proyectado un puente paralelo al ya existente en el tramo comprendido entre las comunidades de Atenquique y San Marcos, al que se le puso por nombre El Nuevo. Con el desarrollo de la obra los pobladores ya cuentan con un acceso más rápido a mejores servicios de salud y seguridad social. **Derecha:** Comunicando a la ciudad de Guadalajara con el puerto de Manzanillo, el puente El Nuevo es la puerta de acceso al tránsito comercial y turístico, siendo así una de las vías más transitadas del país. Cabe señalar que está en un área altamente sísmica, lo que constituyó un factor de gran influencia durante el procedimiento constructivo.

Está ubicado en el km 111+040 de la carretera Guadalajara-Colima, en el municipio de Tuxpan, Jalisco; en las faldas del volcán de Colima. En consecuencia, la estructura se encuentra localizada en una zona altamente sísmica, factor que influyó durante el procedimiento constructivo y definitivamente en su etapa de servicio.

Antecedentes y objetivos

Este puente fue proyectado con alineamiento paralelo al de otro ya existente, por lo que se le denominó El Nuevo, con el fin de modernizar la autopista Guadalajara-Colima, en el tramo comprendido entre las comunidades de Atenquique y San Marcos.

Realizado con concreto reforzado y postensado, con dos claros de 72.70 m cada uno, una longitud total de 145.40 m y 10.50 m de ancho, está sostenido en sus extremos por estribos y en el centro por una pila en forma de V. El sentido transversal lo constituyen dos calzadas de 3.50 m de ancho cada una, con acotamientos de 1.25 m de ancho y parapetos de 0.50 m de altura.

El camino donde se construyó esta obra comunica a Guadalajara con Manzanillo, puerta de acceso al tránsito comercial y turístico, que convierte a esta vía en una de las más transitadas del país, lo que obligó durante el proceso de construcción a mantener abierta la carretera, diseñar un sistema de señalamiento para evitar accidentes y colocar personal de vialidad que mantuviera las condiciones de seguridad en todo momento. Se estima que la construcción de este puente contribuye al crecimiento de los servicios municipales, la infraestructura carretera y el incremento de actividades comerciales, influyendo de manera directa e indirecta en la mejora de la calidad de vida de los sectores sociales involucrados, debido a que los pobladores pueden tener rápido acceso a mejores servicios de salud y de seguridad social.

Estudios preliminares

El estado de Jalisco está sometido a la actividad sísmica de las costas mexicanas en el océano Pacífico, registrando constantemente temblores en su territorio.

Se tomó en cuenta sobre todo el impacto ambiental que la construcción de este puente representaría, por lo que se realizaron diversos estudios sobre la vegetación, la fauna y los residuos que la construcción implicaría. La vegetación presente en la zona de estudio corresponde a selva baja; sin embargo, esta área de proyecto ha sido perturbada por la misma construcción de la carretera actual, así como por la apertura de terrenos al cultivo y aprovechamiento de materiales, considerada como una superficie con vegetación de selva baja caducifolia con vegetación secundaria.

Se determinó que en la zona donde se llevó a cabo este proyecto no se cuenta con un paisaje como tal, ya que son terrenos fragmentados como consecuencia de las obras de la carretera actual y la apertura de terrenos al cultivo y de algunos bancos de material. Se estableció que la calidad paisajística no sería afectada, debido a que la vegetación del área no es homogénea en cuanto a su morfología, estructura y densidad.

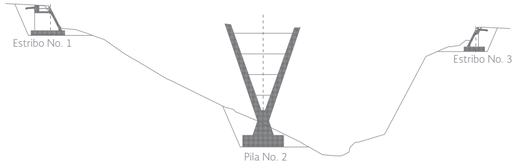
También se tomó en cuenta que no se tendrían pérdidas ni afectaciones de cuerpos de agua superficiales, dado que la etapa de construcción es la que más daña al ambiente. La preparación del sitio se realizó en la época de estiaje, sin afectar los escurrimientos.

En cuanto a la fauna existente en las laterales del camino, se dedujo que se vería afectada al acentuarse el efecto barrera, aunque de manera mínima, dadas las condiciones de la zona, puesto que se aprovecharía la superficie de la carretera actual y su derecho de vía; se esperaba que la pavimentación del camino no provocaría mayores efectos ambientales.

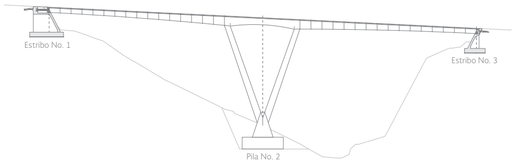
Para la construcción de la dovela de claro fue necesario diseñar la obra falsa que permitiere cimbrar y colar en dos etapas la dovela de 25 m de largo. Las dovelas se atirantaron de manera provisional por medio de un sistema de mástil de acero estructural desplantado en la parte central del claro.

Atirantamiento provisional

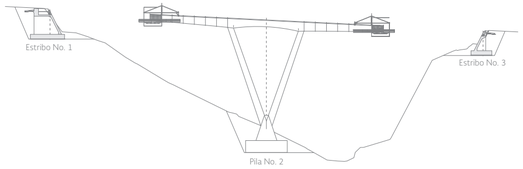
Construcción de pila y estribos



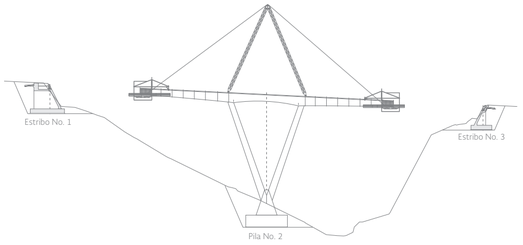
Desmontaje de la torre de atirantamiento provisional y barras de presfuerzo



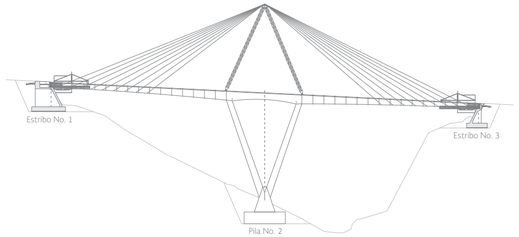
Construcción de dovelas de la superestructura



Colocación de la torre de atirantamiento



Construcción de la última dovela de la superestructura



Cimentación

Para la construcción de la cimentación, en el caso de las columnas de sección cuadrada, se realizó el procedimiento de pozo indio, resultando éste prácticamente artesanal por lo reducido del espacio interior y por el tipo de estratificación en la zona (boleos empacados).

Subestructura

Está soportada por dos estribos y por dos pilas en V de concreto. La construcción de las columnas se realizó con cimbras trepadoras, en secciones o trepados de 2.50 a 3.00 m de altura; cuentan con tres pasarelas de apoyo: la primera bajo el tablero para detallar la zona ya colada; la intermedia para fijación, nivelación y desarmado de la cimbra y la última sobre la cimbra para apoyo del armado de la sección siguiente por colar.

Superestructura

La superestructura está formada por dos voladizos de 60 m de largo y 16 dovelas de concreto armado cada uno. Para la construcción de la dovela del claro fue necesario diseñar la obra falsa que permitiera cimbrar y colar en dos etapas la dovela de 25 m de largo. En cada etapa de colocación de dovelas se tensaron cables de presfuerzo. A partir de la dovela 7 y debido a la esbeltez de las mismas, se atirantaron de manera provisional por medio de un sistema de mástil de acero estructural desplantado en la parte central del claro.

Una vez que se concluyó el voladizo se procedió al retiro de la estructura metálica del mástil que sirvió para el atirantamiento provisional. Después se construyó la capa de rodamiento, la guarnición de concreto y el parapeto metálico.

Enfrente: La superestructura está formada por voladizos de 60 m de largo y está soportada por dos pilas en V de concreto, construidas con cimbras trepadoras, las cuales tienen la ventaja de que se puede trabajar con tableros de grandes dimensiones que se fijan a la zona ya colada del concreto. **Arriba:** El retiro de la estructura metálica del mástil que fue utilizado para el atirantamiento provisional, se hizo una vez que terminó la construcción del voladizo. Después fue colocada la capa de rodamiento, así como la guarnición de concreto y el parapeto metálico.

Puente El Platanito
2012

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Santa Lucía
Km 151+835

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 189 m

No. DE APOYOS: 4

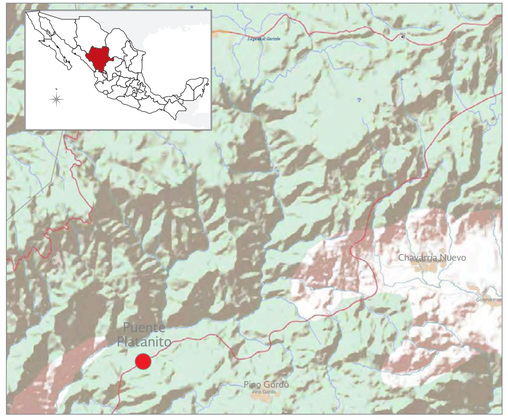
No. DE CLAROS: 3

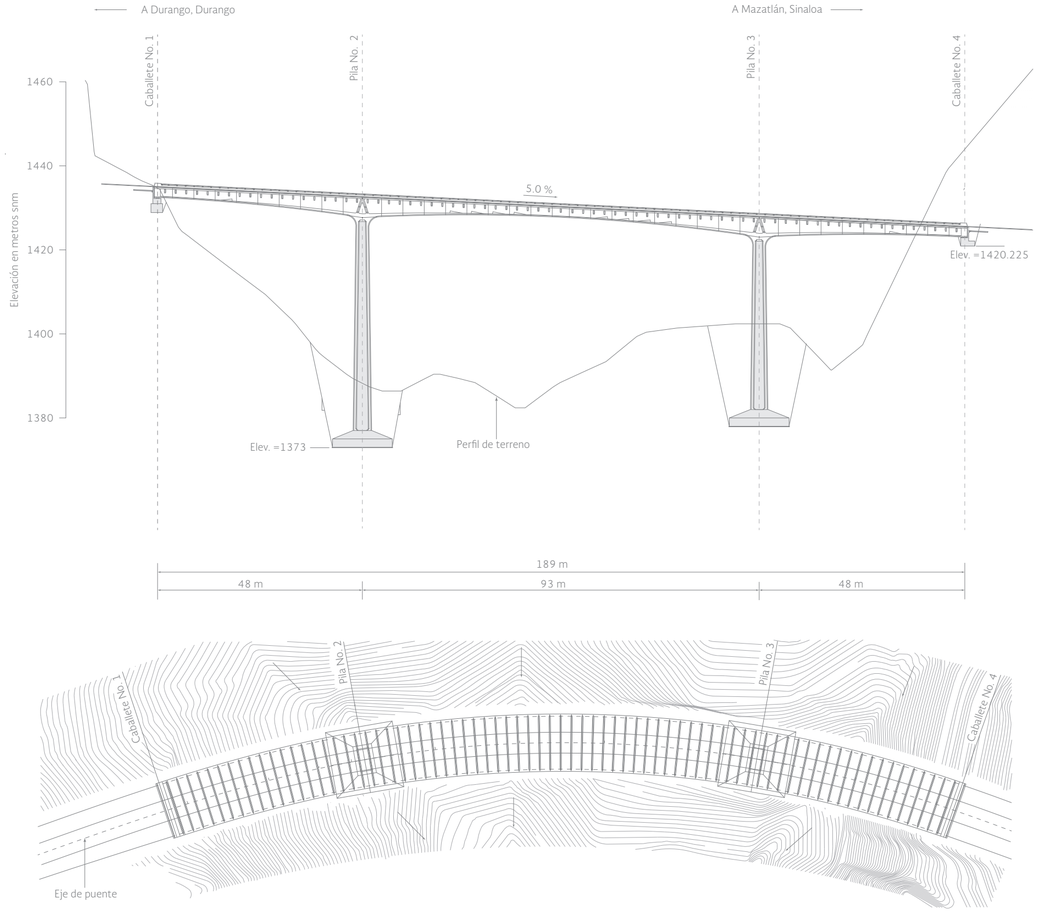
CLARO MÁXIMO: 93 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 54.05 m

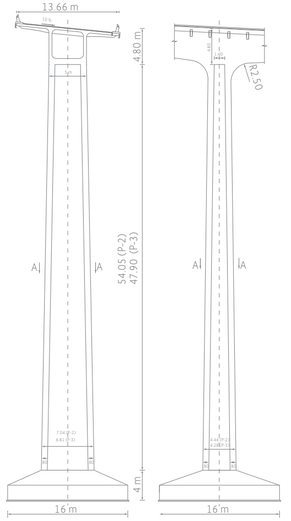
ANCHO TOTAL: 13.76 m

No. DE CARRILES: 2



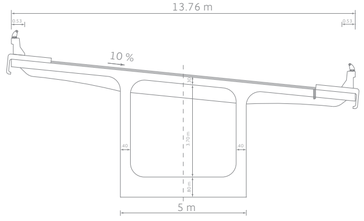


Sección transversal de pila

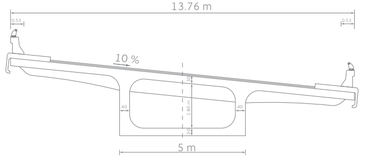


Alzado de pila

Sección transversal por pila



Sección transversal al centro del vano



Antecedentes y objetivos

El puente conocido como El Platanito se ubica en el km 151+835 de la carretera Durango-Mazatlán dentro del tramo El Salto-Santa Lucía, y quedó acotado por el túnel Los Picachos y el túnel Los Becerros.

Originalmente el proyecto consistía en la construcción de dos puentes separados por un tramo del cerro Los Becerros y se utilizaría el sistema constructivo con base en vigas *Nebraska*. Sin embargo, por estar comprendido entre los dos túneles antes mencionados se llegó a la conclusión de que con este procedimiento se presentarían muchos inconvenientes en la logística de la obra porque no se podría disponer de los parques de fabricación necesarios para colocar la lanzadora de trabes en conjunto con las trabes prefabricadas, para lo que se requerían al menos 200 m en cada uno de los linderos.

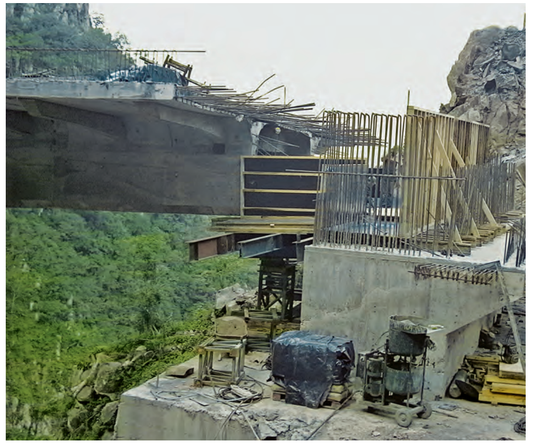
La solución para no construir dos puentes separados por un tramo de carretera sobre un saliente del cerro fue realizar un solo puente cuyo tablero llegara hasta ambos túneles. En el nuevo proyecto que se presentó a la SCT se contempló una estructura construida en doble voladizo, con un total de tres claros para el cual debía ser necesario realizar un volumen de corte de alrededor de 320 000 m³ en el cerro Los Becerros.

Para poder iniciar las tareas programadas en este sitio fue necesaria la construcción de una plataforma sobre el perfil más bajo del terreno; es decir, se tuvo que rellenar parte de la barranca con material obtenido de la zona para poder trabajar sobre terreno firme y acercar la maquinaria disponibe a la parte más alta de la obra.

Ya iniciados los trabajos, una voladura realizada en el mes de agosto de 2011 provocó que decenas de toneladas del material desprendido derribaran parte de la cimbra que ya había sido colocada para la construcción de la pila No. 3, además de arrastrar gran parte de la maquinaria utilizada, por lo que tuvo que reiniciarse la mayoría de los trabajos en esta complicada estructura y retirar los escombros en un máximo de 90 días.

Otro de los inconvenientes que tuvieron que resolverse en la construcción de esta estructura, fue que solamente se contaba con un juego de piezas de cimbrado para la construcción de ambos cuerpos en voladizo, y había que esperar hasta que se realizara la entrega del segundo equipo. Esto representaba una espera de entre 45 a 60 días en que la obra debería estar prácticamente parada. No es común ver que este tipo de elementos se construyan independientemente; sin embargo, en este caso, la solución para no afectar los tiempos destinados para su conclusión fue la construcción del primer cuerpo sobre la pila No. 2 con sus elementos en voladizo para poder trasladar el equipo de cimbrado al eje No. 3, proseguir con el segundo cuerpo y finalmente lograr unirlos mediante la dovela de cierre correspondiente.

A pesar de los contratiempos, la construcción de este puente, que representaba la ruta crítica de este tramo de carretera, se concluyó en un lapso total de tres meses, trabajando dos jornadas diarias de 12 horas cada una.



Cimentación

Con base en las condiciones topográficas y estratigráficas del sitio, así como de los análisis efectuados, se definió una capacidad de carga admisible en el terreno de alrededor de 60 t/m² por lo que se recomendó que la cimentación más adecuada para el proyecto sería de tipo superficial con base en zapatas de concreto reforzado con una resistencia de 400 kg/cm². La forma de estos elementos es de sección cuadrada con dimensiones de 16 x 16 m y una altura de 4 m cada uno.

Subestructura

Como parte de la subestructura se desplantaron dos columnas que dividen al tablero en tres claros. Estos cuerpos mantienen una forma rectangular hueca que resulta irregular y cuyas dimensiones varían respecto del arranque y remate de los mismos, siendo ambas secciones para la pila en el arranque sobre el eje No. 2 de 7.04 x 4.44 m y de 5.00 x 3.06 m, respectivamente, mientras que en la pila sobre el eje No. 3 corresponden a 6.81 x 4.28 m y 5 x 3.06 m, en el remate. Las alturas de las pilas son de 54.05 y 47.90 m, respectivamente. Están fabricadas en concreto armado con resistencia de 400 kg/cm². La subestructura también la conforman los caballetes, elementos que se colocan en los extremos para recibir el peso del tablero; el concreto con el que se fabricaron éstos posee una resistencia igual a 250 kg/cm².

Superestructura

La longitud total del puente es de 189 m repartida entre un claro central de 93 m y dos laterales de 48 m cada uno. El tablero está constituido por 32 dovelas con una longitud individual de 5 m, más dos dovelas sobre pila de 9 m, además de las dos dovelas que se colocan sobre caballetes con un ajuste de 3.50 m y por último la de cierre de 4 m de longitud para llegar a un total de 37 piezas. La dovela mayor cuenta con dimensiones de 5.00 x 4.80 m de altura, y la menor 5.00 x 2.40 m con profundidad variable de acuerdo con su ubicación en el tablero; ambas con un espesor en las paredes laterales de 40 cm; todas fabricadas en concreto con resistencia de 350 kg/cm².

Estos elementos se fabricaron con el sistema de incrementos sucesivos. El colado de las piezas, a diferencia de los demás puentes, no se realizó de manera simultánea entre pilas, sino que se fabricaron primero los elementos en el eje No. 2, para posteriormente utilizar el sistema de cimbrado en la construcción de los elementos en el eje No. 3. El ancho total del tablero es de 13.76 m con una pendiente longitudinal de 5%, y una pendiente en curva de 10% para disminuir el efecto de inercia sobre los vehículos y prevenir algún tipo de accidente en este tramo.

Enfrente: El procedimiento constructivo conocido como sistema de lanzamiento por incrementos sucesivos, generalmente se realiza de manera simétrica, colando los elementos en voladizo sobre su apoyo correspondiente, simultáneamente hasta que ambos tramos se encuentran; sin embargo, en la construcción del puente El Platanito no fue así debido a un retraso en la entrega de los carros de colado. Por esta razón, se determinó dar comienzo a la fabricación del elemento en voladizo sobre la pila No. 2 para posteriormente, trasladar los carros de colado al apoyo sobre el eje 3. **Izquierda:** Una vez concluidos los trabajos de colado sobre la pila No. 2, se trasladó el equipo a la pila No. 3 para continuar con los trabajos de colado de la superestructura. Al encontrarse con el tramo en voladizo correspondiente al eje No. 2 fue colada la dovela de cierre para unir ambos tramos. **Derecha:** Originalmente se había previsto la construcción de dos puentes unidos por un tramo en terreno firme. Finalmente, fue realizado un sólo puente en voladizo que se unió a ambos extremos quedando rematados por los túneles Picachos y Becerros. En estos extremos, se unió el tablero del puente a los caballetes encargados de consolidar el terreno y dar continuidad a la vialidad.

Viaducto Xalapa
2012

EJE TRONCAL
Altiplano

AUTOPISTA
Perote-Xalapa

UBICACIÓN
Perote-Piedra de Agua,
Libramiento Xalapa
Km 61+000

ESTADO
Veracruz

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 470 m

No. DE APOYOS: 5

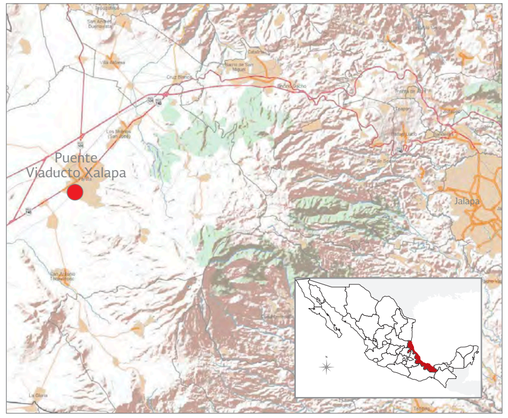
No. DE CLAROS: 4

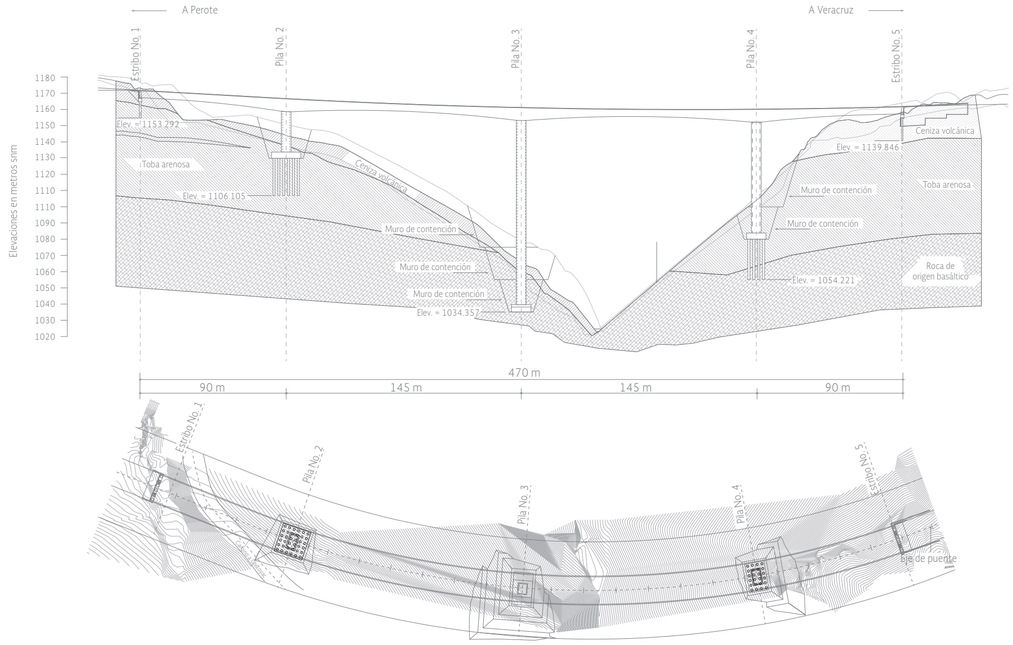
CLARO MÁXIMO: 120 m

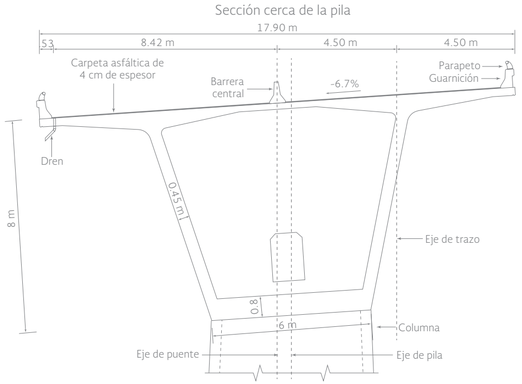
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 113.82 m

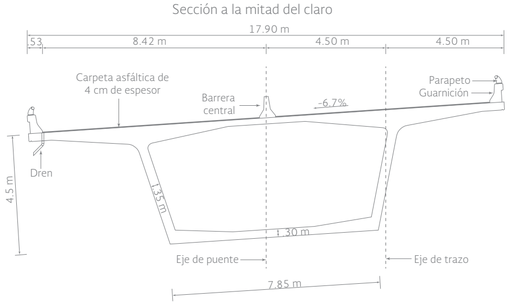
ANCHO TOTAL: 17.90 m

No. DE CARRILES: 4









Antecedentes y objetivos

Este puente forma parte importante de la infraestructura de la autopista conocida como Perote-Xalapa y se ubica a la altura del km 61+000 de manera oficial, aunque realmente se encuentra comprendido entre el km 60+942 y el km 61+412. Fue iniciado el 26 de abril de 2010 y concluido el 9 de abril de 2012.

Este proyecto carretero representa una ventaja de tiempo, al reducir una hora con veinte minutos el trayecto iniciado en el puerto de Veracruz con rumbo a la Ciudad de México. Se ha considerado que este tramo constituyó un gran reto para la ingeniería mexicana, pues incluyó la construcción de este puente, considerado el más elevado de la entidad con alrededor de cien metros de altura.

Estudios preliminares

Parte importante de los trabajos preliminares para llevar a cabo la construcción de esta estructura fue la realización de los caminos de acceso para el traslado de la maquinaria y el material a través de los cambios abruptos de nivel que se presentaron en el terreno, especialmente en el acceso hacia el eje No. 3, el cual inició el trazo principal en el cadenamiento rumbo al puerto de Veracruz y cuya longitud resultó de 460 m, en donde se presentaban pendientes pronunciadas de hasta 14%, con una altura total de 85 m desde el punto inicial hasta el punto final que era el sitio de desplante para la pila No. 3.

En otro de los caminos de acceso se tuvieron que realizar trabajos de excavación a lo largo de 220 m para la estabilización, así como reutilizar ese material como relleno para los siguientes 240 m del camino.

Cimentación

En los estudios correspondientes a mecánica de suelos se encontraron resistencias del terreno comprendidas entre 382 y 492 t/m².

La cimentación que sustenta a las tres pilas principales del puente está constituida por zapatas de concreto armado en forma de prisma rectangular con dimensiones que varían entre 18.00 x 12.00 x 3.80 m y 18.00 x 18.00 x 3.80 m en el eje No. 2. Las zapatas a su vez están desplantadas en una cimentación constituida por un total de 60 pilas repartidas en los tres apoyos, coladas *in situ*, con un diámetro de 1.20 m y profundidades de desplante desde los 23 m hasta los 25 m. Cada una de estas pilas admite una capacidad de carga desde 1 700 hasta 2 572 toneladas.

Por otro lado, la cimentación de los estribos que reciben el puente en los extremos también está formada por pilas, sólo que en estos casos el diámetro requerido fue de tan sólo 0.80 metros.

Subestructura

Una vez terminado el proceso de colado para la cimentación se procede a la instalación de una grúa torre sobre al apoyo más alto –eje No. 3– para las maniobras de elevación de cimbras trepadoras con secciones de 3.00 m de altura que poseen sistemas especiales para su fijación al cuerpo de la pila. Estos equipos cuentan con tres pasarelas: una superior para el armado del acero de refuerzo; una intermedia para fijación y trabajos de la cimbra y una inferior para detallar los sistemas de fijación y manejar las juntas de colado en el concreto.

Respecto de los elementos que componen la subestructura, ya se ha mencionado que constan de tres cuerpos de pila con forma piramidal cuyas secciones van desde 7.07 x 6.00 m hasta 10.07 x 6.00 m en la base, manteniendo una sección de 5.98 x 6.00 m en el punto más alto del cuerpo de pila. La altura mayor de estos elementos se encuentra en el eje No. 3 con un total de 113.82 m, mientras que el cuerpo más bajo se localiza en el eje No. 2, con una altura de tan sólo 25.36 m. Los tres elementos se colaron con concreto reforzado f'c= 300 kg/cm².

Superestructura

La longitud total del puente abarca un tablero de 470 m repartidos en dos claros centrales de 145 m cada uno y dos claros laterales de 90 m de largo cada uno. El ancho de calzada es de 17.90 m para alojar un total de cuatro carriles de circulación en ambos sentidos. El sistema constructivo utilizado para la superestructura consiste en elementos en doble voladizo conocidos como dovelas con peralte variable, entre 4.50 y 7.87 m, unidos con acero de refuerzo y espesores de paredes laterales desde 35 cm hasta 45 cm, fabricados en sitio con concreto reforzado f'c= 400 kg/ cm².

Una vez que se alcanzó la altura considerada para los elementos de la subestructura, se procedió con el montaje de la obra falsa y de la estructura necesaria para fabricar las dovelas sobre pilas.

Después de que el concreto ha alcanzado la resistencia deseada, se hace el tensado y enseguida el montaje de los carros de colado por parejas que ya han sido previamente adaptados a la geometría del proyecto. El montaje de estos carros de colado se realiza con el apoyo de la grúa torre.

En la construcción de ambas dovelas de orilla fue necesaria la utilización de andamios de carga debido a las condiciones del terreno; además, se requirió la construcción de una plantilla con concreto de baja resistencia (f'c= 100 kg/cm²) en ambos estribos, así como de muros con base en concreto ciclópeo para estabilizar el terreno y garantizar la transmisión de cargas al terreno de manera uniforme.

Izquierda: La cimentación está constituida por zapatas de concreto armado cuyas dimensiones varían entre 18.00 x 12.00 x 3.80 m y 18.00 x 18.00 x 3.80 m, que a la vez están apoyadas en una cimentación constituida por un total de 60 pilas coladas *in situ* con profundidades de desplante desde los 23 m hasta los 25 m. Estas dimensiones corresponden a un proyecto en el que se prevé el flujo continuo de vehículos de carga de gran tonelaje. **Derecha:** El sistema constructivo utilizado para la superestructura fue de doble voladizo. Las dovelas tienen un peralte variable entre 4.50 y 7.87 m, unidas con acero de refuerzo y espesores de paredes laterales desde 35 cm hasta 45 cm fabricadas en sitio con concreto reforzado.

Cuando el concreto ya ha alcanzado la resistencia deseada se realiza el tensado y después, con ayuda de la grúa torre, se ejecuta el montaje de los carros de colado por parejas que ya han sido previamente adaptados a la geometría del proyecto. El viaducto es la obra más destacada de esta década en Veracruz.

Puente Santa Lucía
2012

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-La Concordia
Km 175+677

ESTADO
Sinaloa

TIPO DE PUENTE: Empujado /Lanzado de vigas

LONGITUD TOTAL: 375 m

No. DE APOYOS: 9

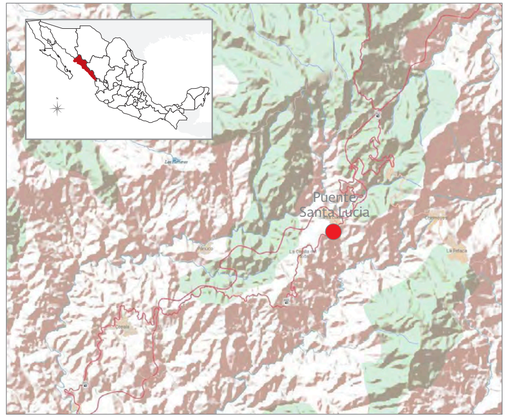
No. DE CLAROS: 8

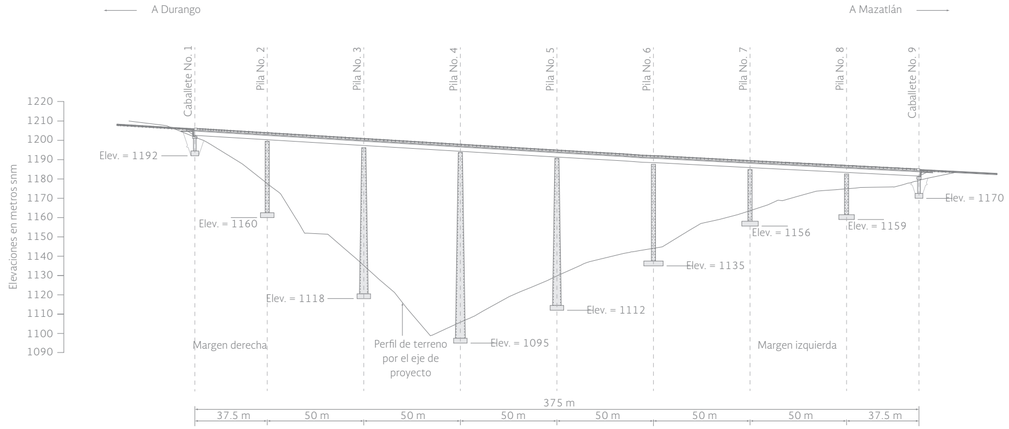
CLARO MÁXIMO: 50 m

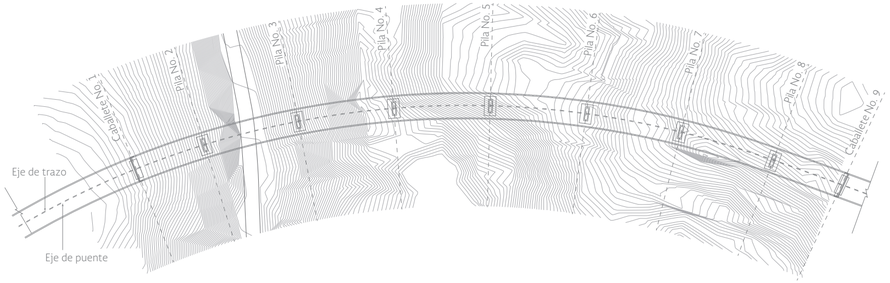
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 96.88 m

ANCHO TOTAL: 13.66 m

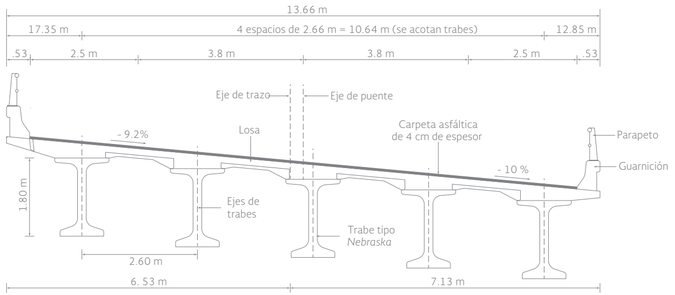
No. DE CARRILES: 2

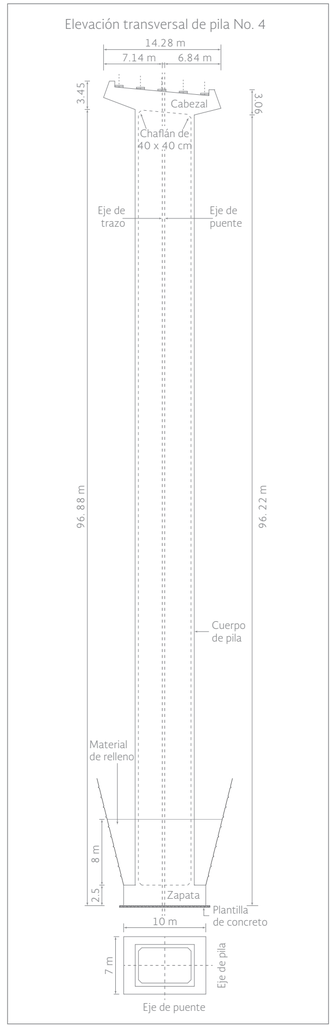






Sección transversal





Antecedentes y objetivos

Nombrado así por colindar con un poblado que lleva el mismo nombre, el puente Santa Lucía se ubica aproximadamente a 120 km hacia el oriente de la ciudad de Mazatlán, sobre la autopista Durango-Mazatlán en el km 175+560. Se trata de uno de los puentes más vistosos de la autopista y el más grande y más alto en dirección oeste al túnel conocido como "El Sinaloense". Tiene la característica de pasar por encima de la antigua carretera haciendo posible admirar su majestuosidad al transitar a través de ésta, cuyo nivel sobre el arroyo que salva se incrementa en temporada de lluvias y lo hace más impresionante al pasar por él.

La construcción de este puente representó una ventaja en cuanto a ahorro de tiempo en el trayecto pasando de seis a tan sólo dos horas y media en el recorrido entre las ciudades de Mazatlán y Durango, además de la reducción de 75 km de distancia entre ambos puntos, al permitir el aumento de velocidad a los usuarios, contar con mayores tramos rectos e incrementar la seguridad de los mismos. Con estas ventajas se buscaba duplicar el tránsito, facilitando así la transportación de todo tipo de mercancías, lo que mejoraría la interconexión entre el golfo de México y la costa del océano Pacífico.

Estudios preliminares

La realización del estudio geológico abarcó principalmente tres etapas. La primera comprendió toda la recopilación y análisis de la información geológica disponible sobre la zona en general.

La segunda etapa consistió en un reconocimiento aéreo del terreno empleando un helicóptero propiedad del Gobierno del estado de Sinaloa, con el objetivo de localizar el sitio donde se desplantaría el puente y determinar cómo se realizaría el acceso al mismo. Posterior a esto, se llevó a cabo el levantamiento en campo, donde se hicieron los sondeos pertinentes a los estudios geofísicos.

Por último, en la tercera etapa se confrontaron los resultados de estos análisis con el fin de obtener las características geológicas más importantes del sitio, determinar los problemas geológicos potenciales y elaborar el informe geológico final.

Procedimiento constructivo

El sistema constructivo empleado para llevar a cabo esta obra es ya bien conocido como sistema de lanzado de vigas tipo *Nebraska*, para salvar en total seis claros centrales con una longitud individual de 50 m y dos claros extremos con una longitud de 37.5 m cada uno.

El proceso constructivo fue desarrollado en las siguientes etapas:

1. Realización de la cimentación de pilas y estribos colocando muros mecánicamente armados para la contención del terreno en las excavaciones realizadas. Construcción de estribos y pilas.
2. Colocación de bancos de arena sobre las pilas para los apoyos temporales, además de dar inicio al montaje de trabes en ambos frentes por medio de una lanzadora de trabes.

3. Concluidos los trabajos de montaje de trabes, se procede a colar los cabezales para ligar éstas a las pilas con un concreto f'c= 350 kg/cm², la losa de rodamiento y cajetines para anclaje de cables de presfuerzo, así como el colado de todos los diafragmas. Cuando el concreto alcanza 80% de su resistencia se tensan los cables de presfuerzo. Se retiran los apoyos temporales de arena y la superestructura comienza a transmitir la carga a los apoyos definitivos.
4. Se realiza el colado del resto de la losa tensando los cables de presfuerzo alternadamente en el momento en que el concreto alcanza 80% de resistencia.
5. Se construyen las guarniciones y parapetos, así como la colocación de la carpeta asfáltica y la fabricación de los terraplenes de acceso al puente.

Cimentación

La capacidad de carga admisible en el terreno es variable de 40 t/m² en los estribos a 65 t/m² en los apoyos subsecuentes, y de 80 t/m² en los apoyos más cercanos al centro del claro.

La cimentación de la subestructura la componen principalmente zapatas aisladas, fabricadas con concreto reforzado con resistencia de 250 kg/cm², de forma rectangular en dimensiones que varían desde 10 x 7 m en la pila No. 3 hasta 12 x 6 m en el caso de la pila No. 6; todas se mantienen con una altura constante de 2.50 metros.

En el caso de los estribos, éstos también están cimentados sobre zapatas con dimensiones de 6 x 12 m y 7 x 16 m, además de contar con tres columnas de 1.20 m de diámetro cada una, sobre las que se apoya el cabezal y el muro diafragma mecánicamente autosoportable.

Subestructura

Está conformada por siete cuerpos de pila que aparentan ser demasiado esbeltos debido a la gran altura con la que cuentan sobre el nivel más profundo de la barranca, teniendo el mayor de estos cuerpos un total de 94.50 m, mientras que el menor de éstos resulta más reducido en su altura con tan sólo 18.25 m. Esto se debe a que la pendiente del terreno resulta bastante abrupta y escarpada en relación con las cortas distancias que se mantienen entre estos elementos.

Respecto de la forma, se trata de secciones huecas rectangulares, variables en los apoyos de los ejes 3 al 5, que son los más altos, se ensancha con geometría piramidal y mantienen secciones constantes en el resto de los ejes. Todos poseen un espesor de pared de 40 centímetros.

Todas las pilas coinciden en dimensiones constantes de 7.20 x 2.20 m en el cierre, variando únicamente en el arranque de las pilas con perfil piramidal al ensancharse hasta 5.10 m en el lado corto.

Estos elementos se unen a la superestructura por medio de cabezales o colados de junta con dimensiones de 13.40 x 1.60 m y 2.80 m de altura, en donde se alojan los apoyos definitivos tipo *Tetron* con capacidad de hasta 356 toneladas.

Superestructura

Este puente cuenta con una longitud total de 375 m repartidos en ocho claros contenidos por el sistema de vigas *Nebraska* de 37.20 a 49.94 m con una altura constante de 2.20 m y un ancho de 1.10 m con una resistencia de hasta 450 kg/cm², separadas por medio de entre-ejes de 2.60 m de largo cada uno.

Una vez colados los diafragmas de 9.22 a 12.55 m de separación entre ellos, se procedió a la colocación de losas prefabricadas con dimensiones de 1.51x1.00 m y 7 cm de espesor a lo largo de los entre-ejes, con resistencias de 250 kg/cm² al centro de los claros y de 450 kg/cm² en las secciones más cercanas a los colados de junta.

Sobre éstas se colaron losas de 18 cm de espesor con sistemas de cables de presfuerzo con base en torones de 13 mm de diámetro.

El ancho total del puente es variable, mantiene 13.66 m en el eje No. 1 y se reduce a 13.06 m al término del eje No. 9.

Enfrente: Las pilas tienen una sección rectangular hueca. Para llevar a cabo esta obra se empleó el sistema constructivo de lanzado de vigas tipo *Nebraska*. La estructura salva un total de seis claros centrales con una longitud de 50 m cada uno, y dos claros extremos de 37.5 m. Concluidos los trabajos de montaje de trabes, se procede a colar los cabezales para ligar éstas a las pilas. **Arriba:** Las pilas se unen a la superestructura por medio de cabezales o colados de junta. Las vigas *Nebraska* tienen una altura constante de 2.20 m y un ancho de 1.10 m. Sobre éstas se colaron losas de 18 cm de espesor con sistemas de cables de presfuerzo con base en torones de 13 mm de diámetro.

Viaducto Botijas
2012

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Santa Lucía
Km 146+869

ESTADO
Durango

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 330 m

No. DE APOYOS: 4

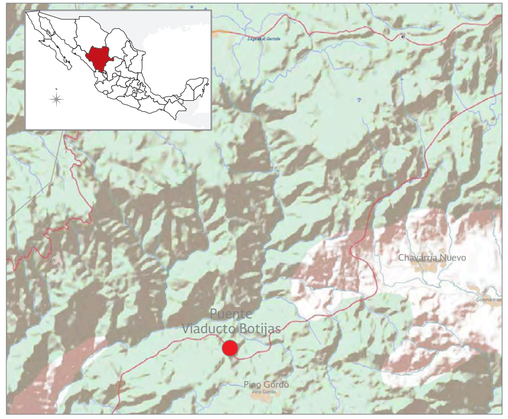
No. DE CLAROS: 3

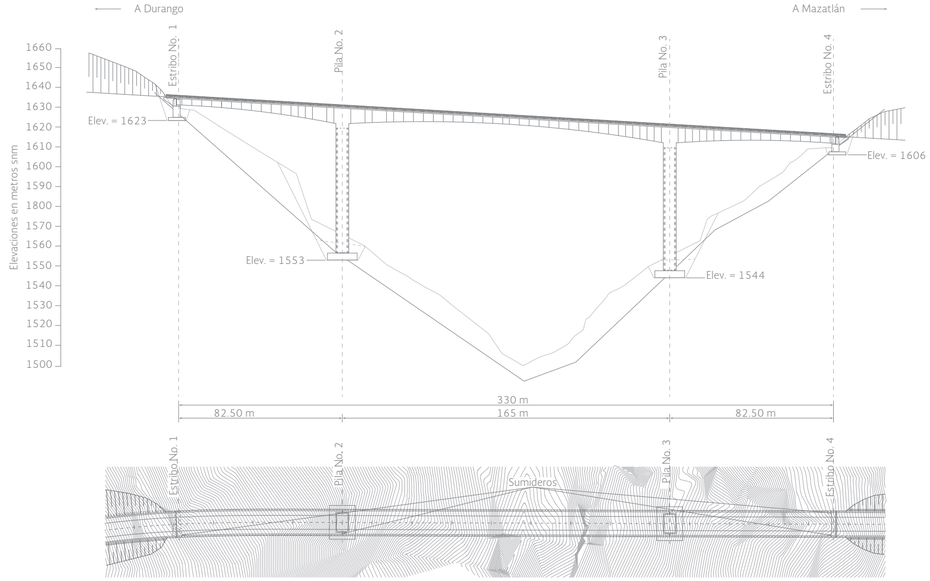
CLARO MÁXIMO: 165 m

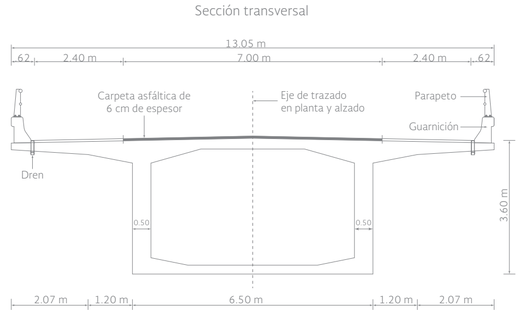
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 72.19 m

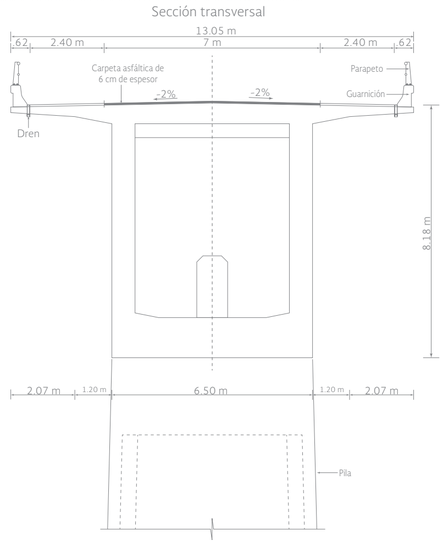
ANCHO TOTAL: 13.05 m

No. DE CARRILES: 2









Antecedentes y objetivos

El viaducto Botijas es uno de los ocho puentes de más de 90 m de longitud que construyó la SCT a lo largo de la autopista Durango-Mazatlán en el km 14+626.47, en los estados de Sinaloa y Durango. Se encuentra dentro del tramo I cuya ejecución dio inicio en el año de 2008.

Este puente forma parte de la autopista que fue creada para tener una ruta más directa por las montañas, mejorando el flujo del turismo y el transporte de mercancías entre la capital de Durango y el puerto de Mazatlán. Esta autopista, además de los múltiples puentes, tiene 63 túneles, los cuales representan 10 veces más de lo construido en cualquier autopista de Norteamérica, por lo que este proyecto es considerado la obra pública más relevante de los últimos años, tanto por su complejidad como por su costo y su importancia estratégica, al vencer el reto de la Sierra Madre Occidental.

Estudios preliminares

Originalmente este puente se proyectó como una estructura de trabes prefabricadas que libraría el cauce del arroyo Botijas, el cual nace a una elevación de 2660 msnm y a 29 km cruza en línea recta al suroeste el poblado de El Salto, en el estado de Durango. Sin embargo, hubo necesidad de hacer un cambio de trazo en el proyecto original, con el objetivo de disminuir la longitud de uno de los túneles que habían sido proyectados inmediatamente después del puente, beneficiando así el tiempo de ejecución y reduciendo el costo.

El principal problema para iniciar la construcción de esta estructura fue el acceso al sitio. Enclavado en el corazón de la Sierra Madre Occidental, en una zona con una orografía formada por magníficos cañones y grandes acantilados que crean una vista impresionante, los trabajos para la construcción de los caminos de acceso fueron afectados por la dureza de la roca que forma este sistema montañoso.

Cimentación

Las pilas descansan sobre zapatas aisladas. Los estribos a los extremos son sistemas cerrados construidos con concreto reforzado. Cuentan con dispositivos de apoyo para tomar reacciones tipo *POT* libre, deslizantes en ambas direcciones. Los dispositivos de apoyo para las reacciones transversales están fabricados con neopreno zunchado.

Subestructura

Las pilas se construyeron utilizando el sistema de cimbra trepante del tipo *Doka*. Son de sección rectangular

Izquierda arriba: Las pilas se construyeron utilizando el sistema de cimbra trepante del tipo *Doka*. Los estribos a los extremos son sistemas cerrados construidos con concreto reforzado. Los dispositivos de apoyo con los que cuentan para las reacciones transversales están fabricados con neopreno zunchado. **Izquierda abajo:** Originalmente este puente se proyectó como una estructura de trabes prefabricadas que libraría el cauce del arroyo Botijas. Sin embargo, con el objetivo de disminuir la longitud de uno de los túneles que habían sido proyectados, hubo la necesidad de cambiar el trazo en el proyecto original. **Derecha:** La superestructura está formada por una viga continua de concreto postensado de sección cajón variable. El tablero se diseñó para construirse por avance en voladizos sucesivos con un ritmo de construcción muy acelerado. Se lograron avances que permitieron construir tres dovelas cada dos semanas.

hueca con dimensiones de 6.50 x 6.50 m. Transversalmente esta sección va aumentando en forma diagonal hasta formar un talud que inicia con 1.40 m hasta llegar a los 7.90 m. El espesor de pared es de 40 cm. La altura de las pilas varía entre 69.50 y 72.19 metros.

Superestructura

Está formada por una viga continua de concreto postensado de sección cajón variable; el tablero se diseñó para construirse por avance en voladizos sucesivos con un ritmo de construcción acelerado pues se implementaron dobles turnos de trabajo, una logística muy bien diseñada para la secuencia de las diversas actividades y concretos de alta resistencia con tiempos de fraguado de 36 y 24 horas. Se lograron avances que permitieron construir tres dovelas cada dos semanas, lo que implicó una disminución en el ciclo típico de una dovela por semana y permitió terminar el tablero en cinco meses, un tiempo récord dadas las difíciles condiciones que se presentan en un lugar tan escarpado en la sierra.

Con una longitud de 330 m, esta estructura de concreto postensado libra un claro central de 165 m lo que, para un puente especial de este tipo, implica un alto grado de tecnología. La premisa principal fue evitar que alguna de las pilas quedara en el cauce del arroyo, lo que obligó a proponer este claro desde un principio.

Son 71 las dovelas que conforman la superestructura. Gran parte de éstas tienen tramos de 6.00 m de longitud. Están fabricadas con concreto reforzado, con presfuerzo en ambos sentidos de la pieza. Conservan una altura variable de acuerdo con su ubicación dentro del claro, que va de 3.60 la mínima a 8.18 m, la máxima.

Puente La Cascada
2012

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Santa Lucía
Km 168+200

ESTADO
Sinaloa

TIPO DE PUENTE: Lanzado de trabes

LONGITUD TOTAL: 325 m

No. DE APOYOS: 8

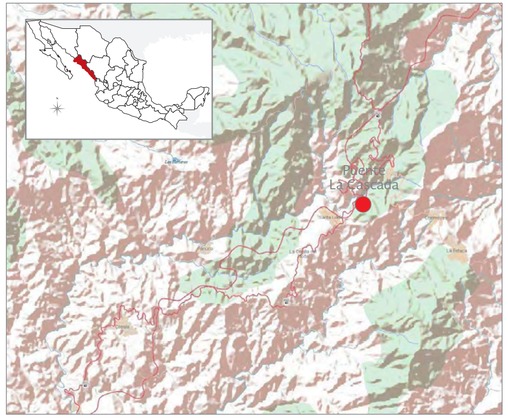
No. DE CLAROS: 7

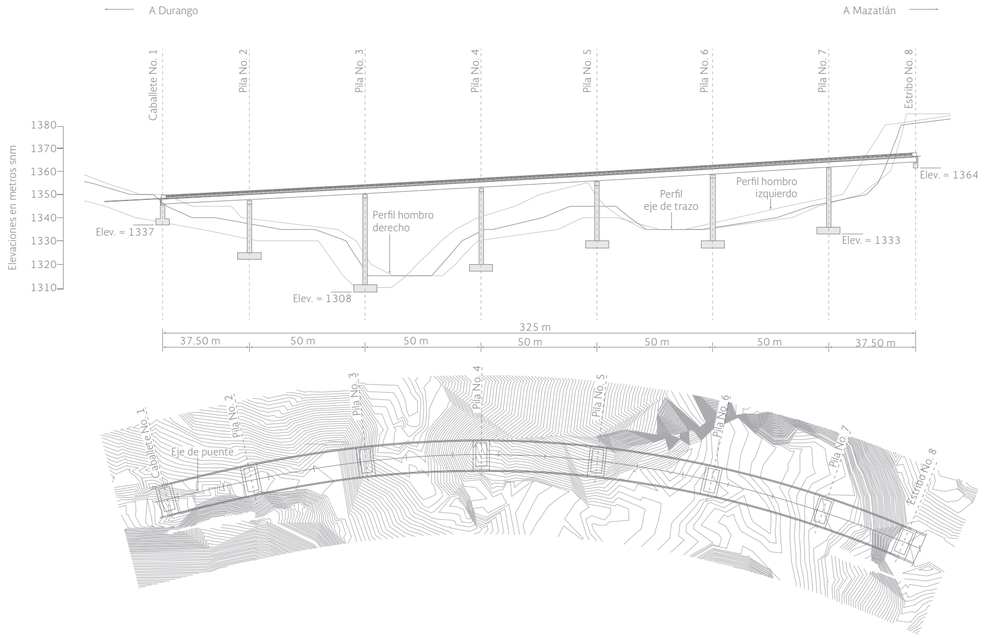
CLARO MÁXIMO: 50 m

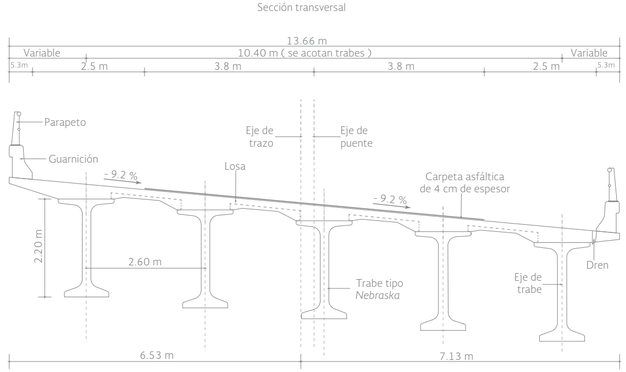
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 44.89 m

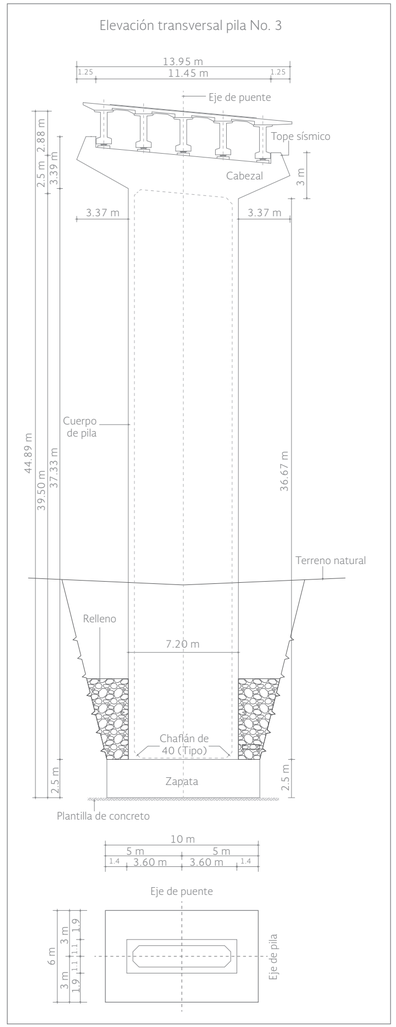
ANCHO TOTAL: 13.66 m

No. DE CARRILES: 2









El puente La Cascada se encuentra en la carretera Durango-Mazatlán en el km 168+200, específicamente en el tramo Durango-El Salto; su longitud total es de 325.00 m. Se trata de un puente de trabes, empujado con sus elementos colados *in situ* que cruza un arroyo sin nombre.

Antecedentes y objetivos

Como parte integral de los proyectos ejecutivos más importantes de infraestructura en los últimos años, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes desarrolló arduos trabajos para optimar el trayecto entre las ciudades de Durango y Mazatlán, interviniendo en una longitud total de 230 km de carretera y logrando así reducir el tiempo de recorrido para automóviles de 6 a 2.5 horas, lo que representa un gran desafío para la ingeniería mexicana por encontrarse una gran parte del tramo carretero insertado dentro de la Sierra Madre Occidental.

El puente La Cascada forma parte de un total de 115 puentes construidos para llevar a cabo de forma óptima este magno proyecto.

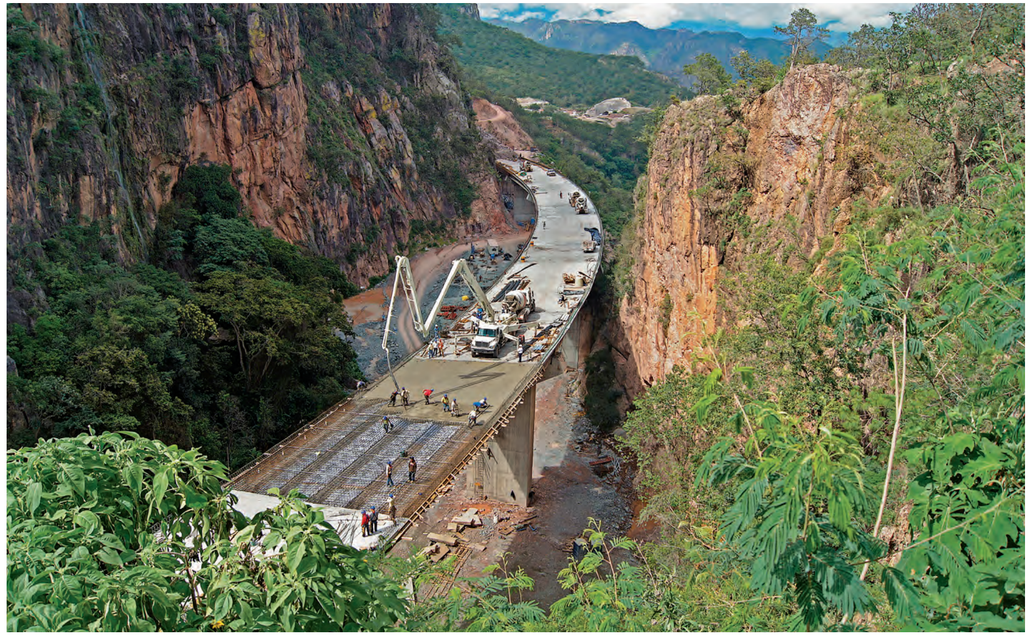
Estudios preliminares

Desde el punto de vista geométrico, el puente proyectado inicia en una tangente vertical que se une en el km 168+090 con una curva en sentido vertical a manera de columpio con pendientes de entrada de +5.19% y una pendiente de salida de +6.0% El proyecto original mostraba un esviajado en curva menos pronunciado, pero por condiciones del terreno se modificó.

El dimensionamiento de los elementos integrantes tanto de la superestructura como de la subestructura, así como de los muros de contención se basaron en las normas AASHTO, en la *Normatividad para la Infraestructura del Transporte* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en las normas de la DGCF, así como en el *Manual de Diseño Sísmico*, de la Comisión Federal de Electricidad.

Cimentación

El puente cuenta con un total de ocho apoyos, de los cuales dos corresponden a estribos de concreto reforzado en los extremos. El resto está conformado por seis pilas apoyadas sobre zapatas aisladas del mismo material y con una sección rectangular, con una dimensión máxima de 6.00x10.00 m y 2.50 m de peralte. Los apoyos intermedios se encuentran desplantados superficialmente. Para encontrar terreno con capacidad de carga suficiente, se tuvo que excavar hasta profundidades de 15 a 20 m dependiendo de la zapata. Para proteger la cimentación se tuvieron que construir



muros de contención alrededor de las zapatas para evitar el deslave del terreno y daños a la infraestructura.

Subestructura

El cuerpo de las pilas es de sección rectangular hueca con dimensiones de 7.20 x 2.20 m y un espesor de pared de 0.40 m, con una altura mínima de pila de 28.30 m y una altura máxima igual a 44.89 m. En este punto se conectan con cabezales de concreto reforzado con dimensiones de 14.00 x 2.50 m y una altura máxima de 2.60 m para unirlas a la superestructura. Todos los elementos descritos poseen una resistencia de $f'c = 250$ kg/cm^2. Las pilas se encuentran sumergidas aproximadamente a la tercera parte de su longitud.

Superestructura

Se trata de una losa de concreto reforzado de 30 cm de espesor constituida por dos tramos: el primero de cuatro claros, dos hacia los extremos de 37.50 m de largo y al centro otros dos de 50.00 m. El segundo tramo está formado por tres claros de 50.00 m de largo apoyados sobre prelosas de concreto reforzado con $f'c = 250$ kg/cm^2, así como sobre cinco vigas *Nebraska* separadas a cada 2.60 m de 2.20 m de peralte, fabricadas con concreto presforzado postensado, con lo que se logra un ancho de calzada de 12.60 m y un ancho total de 13.66 metros.

Transversalmente a estas vigas se encuentran diafragmas del mismo material que evitan la deformación de esos elementos. En la parte donde se conectan con el cabezal de la pila se realizaron colados de liga. La resistencia del material en estos elementos es igual a $f'c = 350$ km/cm^2 y $f'c = 450$ kg/cm^2, respectivamente.

Sobre la losa se colocó una carpeta asfáltica de 4 cm de espesor. En los estribos se utilizaron apoyos especiales tipo *Tetron* para amortiguar el desplazamiento de los elementos y el empuje hacia el terreno.

Enfrente: La subestructura está formada por siete pilas de sección rectangular hueca apoyadas sobre zapatas aisladas de concreto reforzado; éstas se conectan a los cabezales, para unirlas a la superestructura. La pila más alta mide 28.30 m, mientras que la de la más corta es de 44.89 metros. **Arriba:** La superestructura está conformada por una losa de concreto reforzado de 30 cm de espesor, constituida por dos tramos; éstos se encuentran apoyados sobre prelosas de concreto reforzado y sobre cinco vigas *Nebraska* fabricadas con concreto presforzado postensado. Éste es uno más de los puentes en que se combinan sistemas constructivos útiles para resolver la compleja orografía en que se encuentra.

Desvío Ferroviario Vaso II de la laguna de Cuyutlán
2012

EJE FERROVIARIO
Irapuato-Manzanillo

LÍNEA FERROVIARIA
Colima-Manzanillo

ESTADO
Colima

TIPO DE PUENTE: Trabes

LONGITUD TOTAL: 12.75 km

No. DE APOYOS: 1231 pilastrones y 1261 cabezales

LONGITUD DE TRABE: 28 m

CLARO MÁXIMO: 28 m

ANCHO TOTAL: 8.40 m

No. DE CARRILES: 1

Antecedentes

La construcción del Desvío Ferroviario en la laguna de Cuyutlán surgió como un proyecto inducido por la necesidad de la Comisión Federal de Electricidad de construir una Terminal de Almacenamiento y Regasificación de Gas Natural (TARGNL) que permita asegurar el abastecimiento de gas natural a las centrales de la zona occidente del país, y convertirse en una fuente alterna para el suministro de dicho combustible, además de sustituir el uso del combustóleo utilizado en la Central Termoeléctrica Manzanillo I de la CFE, reduciendo así la contaminación provocada por la planta generadora lo que busca mejorar el aspecto del puerto de Manzanillo, en beneficio, principalmente, del sector turístico.

La operación de la terminal requería del ingreso de barcos de gran calado que portadores del suministro de gas comprimido con dimensiones equivalentes a dos edificios de quince pisos, entrando a través del canal de Tepalcates sobre el cual se encontraban construidos un puente ferroviario y un carretero. Las dimensiones de dichos barcos hicieron indispensable la ampliación del canal que antes contaba con 80 m de ancho por 3.50 m de profundidad a dimensiones de hasta 400 m de ancho por 15 m de profundidad, lo que provocó la demolición de los puentes que cruzaban el canal, y tuvieron que construirse dos puente provisionales que garantizaren la ejecución de las obras con las menores afectaciones posibles a los habitantes de la zona y al óptimo funcionamiento del puerto de Manzanillo.

Entre otros beneficios, la realización de este proyecto logró evitar que las maniobras del trayecto del ferrocarril detuvieran por tiempo prolongado el tránsito vehicular ya que el nuevo trazo de la vía eliminó cinco cruces entre ambos medios de transporte en la zona centro del puerto de Manzanillo.

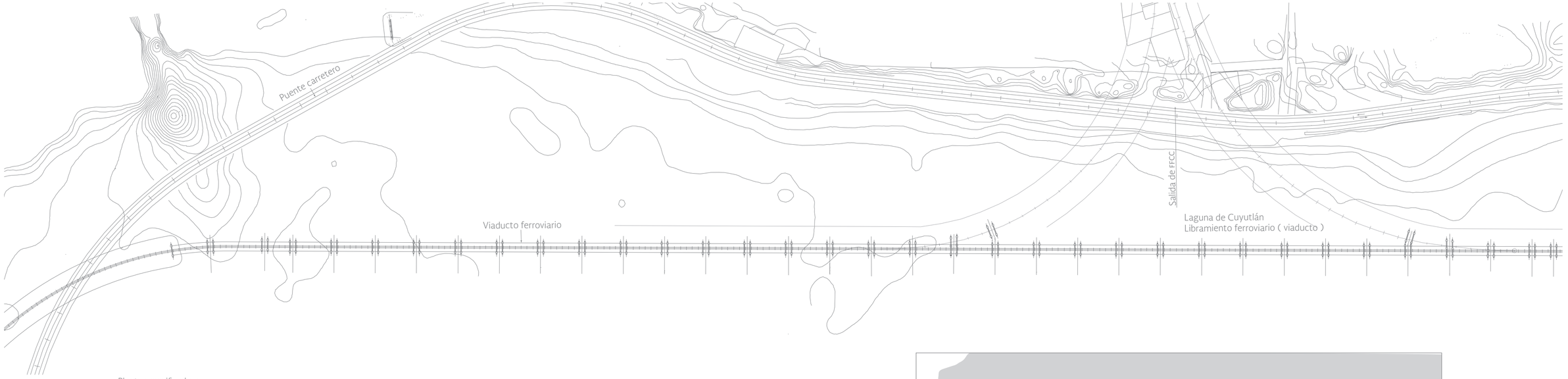
Este magno proyecto, en zona conurbada, implicó también la construcción de varias obras de compensación: pavimentación de calles, reubicación de tuberías de drenaje y de agua potable, ductos de instalaciones eléctricas, reubicación de los muelles y las plataformas para los pescadores.

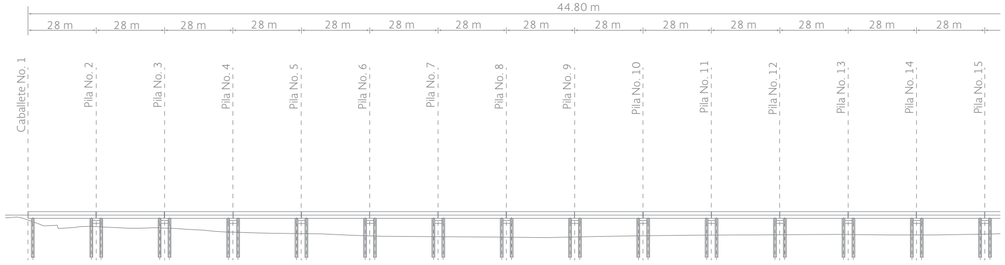
Estudios preliminares

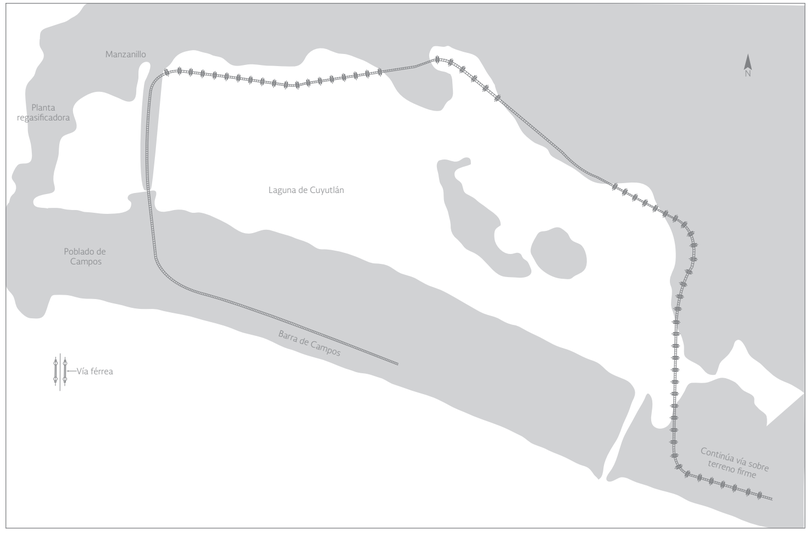
De ingeniería cien por ciento mexicana, el Desvío Ferroviario comenzaba a anunciarse en mesas de trabajo multidisciplinarias, sobre las que más de 550 planos se tendían para su estudio. De este modo, se iba preparando el terreno físico para concebir el proyecto, el cual no podía superar los 14 meses por la premura que representaba la reubicación de la vía ferroviaria, toda vez que, de su conclusión a tiempo, dependían otras actividades como la demolición de los puentes provisionales, el dragado del canal de Tepalcates y las obras de protección de éste; todas éstas indispensables para que la terminal de regasificación de la CFE entrar en operación en la fecha establecida. En cuanto a la forma, ésta tenía que cumplirse en una edificación ideal a las necesidades operativas del concesionario de la vía férrea —Ferrocarriles de México, así como de la salvaguarda del medio ambiente.

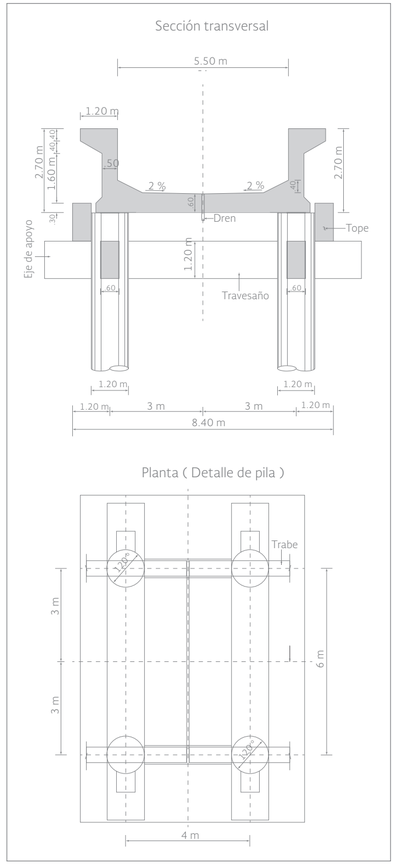
El ingenio de los constructores se echó a andar, pasando por cinco posibilidades, entre las que se encontraron propuestas como la construcción de un puente basculante, la construcción de dos puentes atirantados, la construcción de un pedraplén en la zona lagunar, hasta llegar al libramiento que rodeara el Vaso II de la laguna de Cuyutlán desde un punto situado entre la autopista Armería-Manzanillo y el canal de Tepalcates hasta concluir en el extremo norte de la vía actual.

Izquierda: El Desvío Ferroviario es la obra más destacada de vías terrestres en el estado de Colima. Para los trabajos de campo se destinaron dos brigadas de topografía que realizaron un detallado levantamiento a lo largo de 11.40 km. Se hicieron 180 sondeos profundos que permitieron conocer la estratigrafía de la zona. Con apoyo de la interpretación geológica y geotécnica quedaron definidos los procedimientos constructivos para realizar la cimentación, los cortes y terraplenes necesarios; precisando los métodos de estabilización de los taludes para aquellos cortes que llegaron a tener hasta 25 m de altura. Los estudios también concluyeron que era necesario proveer al terreno de una resistencia de 40 ton/m² para posteriormente tender las terracerías y la estructura ferroviaria, consistente en: sub-balasto, balasto, durmientes y vías. **Derecha:** Montaje de la superestructura con base en vigas de 28 m de longitud, que se utilizan de manera común (por el avance comprobado) en obras de gran magnitud, como la ampliación del actual puerto de Manzanillo, en la zona norte. Conviene subrayar que esta obra busca satisfacer la demanda de movilización de transporte de carga privilegiando el uso del ferrocarril, ya que actualmente atiende 20% del total del volumen de contenedores que ingresan al país. El resto (80%) se traslada por carretera.


Puente carretero
Salida de FFCC
Viaducto ferroviario
Laguna de Cuyutlán
Libramiento ferroviario (viaducto)
Planta regasificadora


44.80 m
28 m
Caballete No. 1
Pila No. 2
Pila No. 3
Pila No. 4
Pila No. 5
Pila No. 6
Pila No. 7
Pila No. 8
Pila No. 9
Pila No. 10
Pila No. 11
Pila No. 12
Pila No. 13
Pila No. 14
Pila No. 15


Manzanillo
Planta regasificadora
Laguna de Cuyutlán
Poblado de Campos
Barra de Campos
Vía férrea
Continúa vía sobre terreno firme
N



El proyecto consideraba un trazo dentro de la zona lagunar construyendo un viaducto de 7.9 m de ancho con pilas coladas *in situ* y claros de hasta 28 m de longitud, con una losa de concreto reforzado sobre la que se construiría la vía férrea.

Durante los trabajos de campo se levantaron a detalle los 11.4 km del terreno en que se conformaría el Desvío Ferroviario mediante 180 sondeos que permitieron conocer la estratigrafía de la zona donde se desplantarían los viaductos de dicho desvío.

En cuestiones legales, hubo complicaciones puesto que dentro del derecho de vía habían 3 km que afectaban propiedad comunal, ejidal y privada por lo que fue necesaria la presencia del Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales que se dio a la tarea de compensar a los poseedores de dichos terrenos.

Con todos estos trabajos preliminares, y debido a la extensa longitud del Desvío Ferroviario que hacía variar las condiciones del suelo en cada porción de terreno, fue necesaria la construcción de este proyecto por tramos, variando así las condiciones y necesidades entre un punto y otro. La principal variación radicó en que no se trataba de un puente construido sobre el agua, sino que constó de tramos sobre tierra firme donde fue necesario realizar túneles falsos desde 66 m hasta 160 m de longitud, con dovelas tipo *Techspan* de concreto prefabricado cuya función exclusiva fue proteger contra caídos de pequeño volumen, consistentes en arcos enterrados en dos piezas, con claros de alrededor de 11 m y flechas de 9.90 m, cimentados sobre zapatas corridas con dimensiones de 1.05 m de peralte y ancho de 2.30 m de concreto presforzado.

Preparación del terreno

Para llevar a cabo los trabajos de cimentación de los viaductos fue necesario realizar diversas labores de estabilización del suelo, por encontrarse sumergido en un cuerpo acuoso.

Entre éstas se encuentra la construcción de pedraplenes, colocando en primer lugar un geotextil y una malla para la estabilización del camino provisional sobre los suelos blandos. Después se colocó roca directamente sobre el geotextil. En este proceso fueron apareciendo olas de lodo laterales al camino, producto de la sobrecarga durante la colocación del agregado, por lo que se colocaron costales rellenos de arena para

Enfrente arriba: El tramo construido sobre la Laguna de Cuyutlán cuenta con tres viaductos elevados edificados en 80% sobre agua. Para llevar a cabo estos trabajos fue necesario construir un pedraplén entre los kilómetros pues en esta zona la turba alcanza hasta 14.8 m de espesor. Debido a esto se realizó la colocación de geomalla y geotextil sobre el terreno con el fin de estabilizar el camino provisional sobre los suelos blandos; después se colocó roca sobre estos elementos. Una vez que logró estabilizarse el camino provisional se colocó una capa de material selecto y se utilizó un producto especial para incrementar la capacidad de carga del camino, así como el tránsito de grúas de hasta 350 toneladas. **Enfrente abajo:** Esta obra contrajo grandes beneficios para los habitantes del puerto de Manzanillo pues se logró retirar las vías a las afueras de la ciudad y frenar el bloqueo de sus vialidades debido al paso del ferrocarril. Paralelamente a la construcción del Desvío Ferroviario se realizaron tareas de relevancia para el medio ambiente tales como la reforestación del manglar de la Laguna de Cuyutlán. Este proyecto representa el viaducto ferroviario más largo en América Latina y uno de los más largos alrededor del mundo. **Arriba:** Durante casi cinco meses de trabajo, se realizó la revisión del proyecto para el Desvío Ferroviario en reuniones donde se tendieron más de 550 planos para su estudio y cuantificación. De este modo se hicieron los preparativos, tanto en el terreno físico como en el de las ideas, para llevar a cabo la materialización del proyecto que cumplió en tiempo y forma con las especificaciones anticipadas gracias a las labores de una ingeniería cien por ciento mexicana.

Arriba: El trazo de la vía férrea para los tramos comprendidos dentro de la zona lacustre estuvieron basados en un viaducto de 7.90 m de ancho, se conformaron isletas para cada uno de los apoyos, que permitirían alojar el equipo necesario para la construcción de pilas de cimentación, y que fueron coladas in situ. Sobre éstas, se dispuso de una losa de concreto reforzado para albergar gravas, durmientes y demás componentes necesarios para el tránsito del ferrocarril. **Abajo:** En los tramos de corte donde fue necesaria la construcción de túneles falsos, se formaron bermas e instalaron mallas de triple torsión hibrida contra los efectos de corrosión provocados por la alta salinidad de la zona, acompañadas a la vez con malla plástica para la protección de taludes contra la erosión superficial. Éstas quedaron sujetadas a la pendiente por medio de anclas formadas por barras de acero de alta resistencia.

fijar el geotextil en el fondo de la laguna que a su vez dieron confinamiento lateral al terraplén. Una vez estabilizado el camino provisional se colocó una capa de material selecto para aumentar la capacidad del camino al paso de las grúas con cargas de hasta 350 toneladas.

También cuentan las labores de dragado con un ancho de 40 m y profundidades de hasta 3 m para la construcción de plataformas formadas por pontones que permitieren el paso de la maquinaria necesaria para las maniobras de colocación de pilastrones, cabezales y montajes de trabes.

Para poder trabajar en el agua se utilizaron embarcaciones planas en forma de balsas conocidas como "chalanes", con dimensiones de 10 x 22 m sobre las que se montó toda la maquinaria requerida para la construcción. Asimismo, resultó indispensable la hechura de un muelle desde donde se llevaron a cabo las maniobras de carga y descarga de dicha maquinaria.

Cimentación y subestructura

Se conforma por un total de 318 bancos de cuatro pilastrones cada uno con diámetro de 1.5 m, hincados a una profundidad de 22 m, colados con concreto hidráulico f'c= 250 kg/cm². Para lograr la fabricación de estos elementos bajo el agua se realizó el siguiente procedimiento constructivo:

A través de una perforación por vibro-hincado, se fue clavando el ademe y se insertó hasta una profundidad de 21 metros. Se colocó el ademe en la perforación para confinar el colado del concreto. Una vez fijado éste, se retiró el material en su interior para realizar la instalación del acero de refuerzo (o espárragos). Finalmente, se hizo el vaciado del concreto por medio de un tubo *Tremie* comenzando desde el fondo y en dirección a la superficie. Con el mismo método –exceptuando el hincado en la tierra– se realizó la parte visible sobre el nivel del agua.

Superestructura

Una vez construidos los pilastrones se procedió a la colocación de los cabezales y travesaños que conformarían la unión entre columnas. Sobre los travesaños se dispusieron cuatro bancos de 1.50 m de diámetro cada uno con un peralte de 70 cm entre los que se fijaron los apoyos tipo *Tetron* para amortiguar los esfuerzos sísmicos.

Sobre estos elementos se colocaron las trabes de 2.70 m de peralte con una longitud de claro total de 28 m. Entre éstas se coló una losa de concreto armado con espesor de 60 a 80 cm a través de un dispositivo de cimbra deslizante. Sobre esta losa se aplicó una capa de sub-balasto de 40 cm, y otra de balasto con 30 cm de espesor. Tendido el balasto, se colocaron

casi 40 000 durmientes de concreto sobre los que se asentaría la vía con un peso de 115 lb/yd sin olvidar el contrarriel, un mecanismo de alta seguridad que ante cualquier contingencia o posibilidad de descarrilamiento contiene el ferrocarril evitando que vuelque.

Impacto ambiental

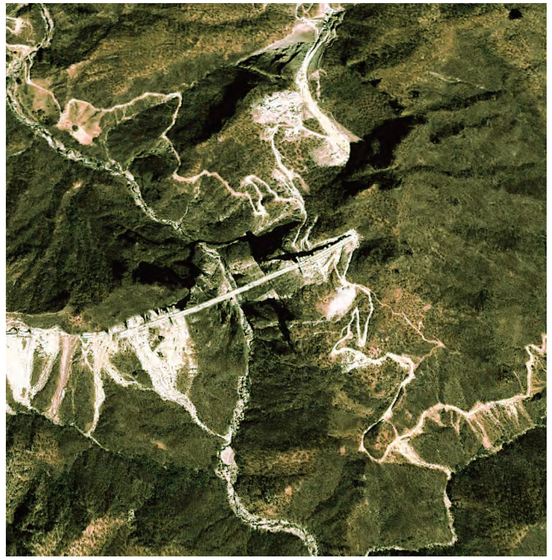
La laguna de Cuyutlán se destaca por poseer un borde donde crece una estrecha comunidad de mangle y zonas altas con selva baja caducifolia que forman un papel importante en el aporte de hojarasca de *detritus*, base de la cadena alimenticia del sistema lagunar. Por eso constituye un importante sitio de alevinaje, alimentación y refugio de reptiles, aves, peces y crustáceos que representan una fuente principal de ingresos para las familias asentadas en las márgenes de la laguna, por lo que toda acción antrópica que se desarrolle debe quedar sujeta a la aplicación de medidas de mitigación y a un diseño ambientalmente adecuado al sistema natural.

De ahí la importancia de la ejecución del Desvío Ferroviario sobre viaductos que implicaban un diseño más amigable con el medio ambiente, tanto en el transcurso de su ejecución como en las labores previas y posteriores a ésta, teniendo que someterse en todo momento a la lista de condiciones especificados por la Semarnat que incluía labores como rescate de flora, fauna, suelo, reforestación, manejo de residuos de la obra y cuidado de la sanidad del agua.

En cumplimiento de los términos y las condiciones emitidas en las citadas autorizaciones, se realizaron las siguientes acciones:

- Rescate de aproximadamente 16 721 plantas de selva baja, cactáceas y mangle que se encontraban dentro del derecho de vía.
- Instalación de un vivero rústico provisional para albergar a las plantas rescatadas y la producción de aproximadamente 200 000 plántulas que fueron utilizadas para reforestar las superficies afectadas por las obras y superficies requeridas en el resolutivo a manera de compensación ambiental.
- Reforestación de 52.1 ha de selva baja y de 12.2 ha de mangle.
- Reubicación de plantas rescatadas en 2.21 hectáreas.
- Rescate de 1003 m³ de suelo orgánico procedente del despalme y su mejoramiento mediante composta, aprovechando el material del desmonte y residuos orgánicos de la obra, para utilizarlo en las actividades de reforestación.
- Rescate y reubicación de 2 569 individuos de fauna silvestre en ecosistemas aledaños con mejores condiciones de hábitat.

En total son 1 272 los elementos conformados en blancas hileras que dan sustento a la subestructura del proyecto Cuyutlán. Una de las mayores ventajas de esta obra fue el hecho de que sus piezas se diseñaron de tal forma que resultó sencillo dotarla de continuidad y consistencia, sin necesidad de diversificar equipos y técnicas de construcción.



Puente Baluarte
2012

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Concordia
Km 157+800

ESTADOS
Durango y Sinaloa

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 1124 m

No. DE APOYOS: 12

No. DE CLAROS: 11

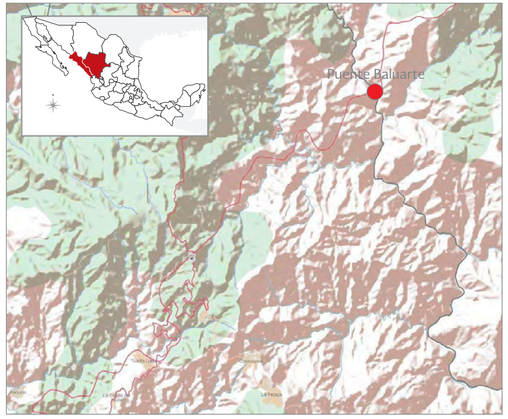
CLARO MÁXIMO: 520 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 60.94 m

No. DE TIRANTES: 152

ANCHO TOTAL: 22 m

No. DE CARRILES: 4

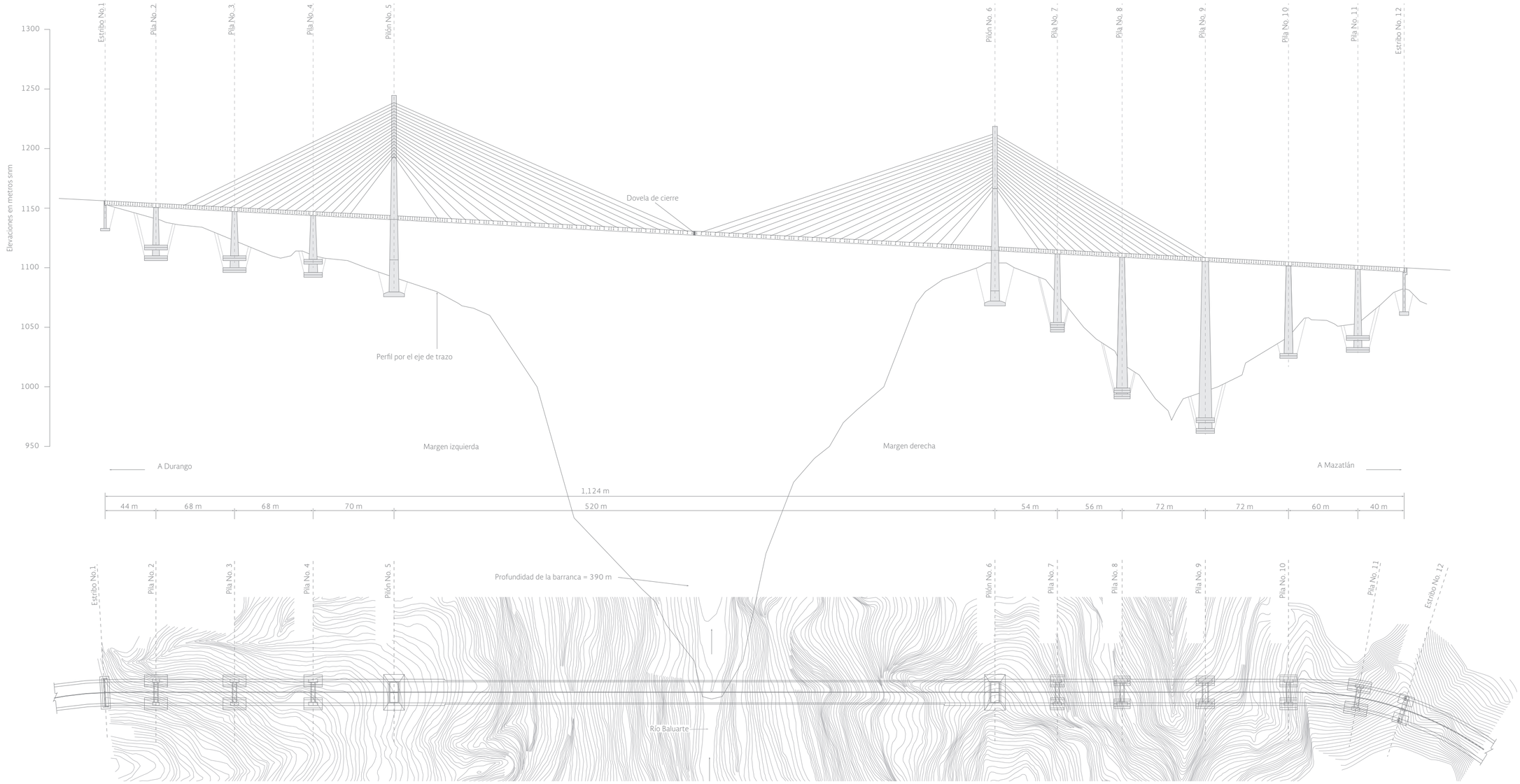


Entre los numerosos e importantes ejes carreteros cuya realización se ha emprendido en las últimas décadas a fin de aprovechar en términos de comercio la ventajosa posición geográfica de México, adyacente al gran mercado económico de América del Norte y con costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico, el más ambicioso es sin lugar a dudas, el que comunica los puertos de Tampico y Mazatlán. Una vez terminado, este eje hará realidad una posibilidad de tráfico comercial detectada desde mediados del siglo XIX, y habrá salvado lo que desde entonces se identificó como el desafío de ingeniería más formidable: cruzar la Sierra Madre Occidental. Toca a la autopista Durango-Mazatlán resolver dicho desafío.

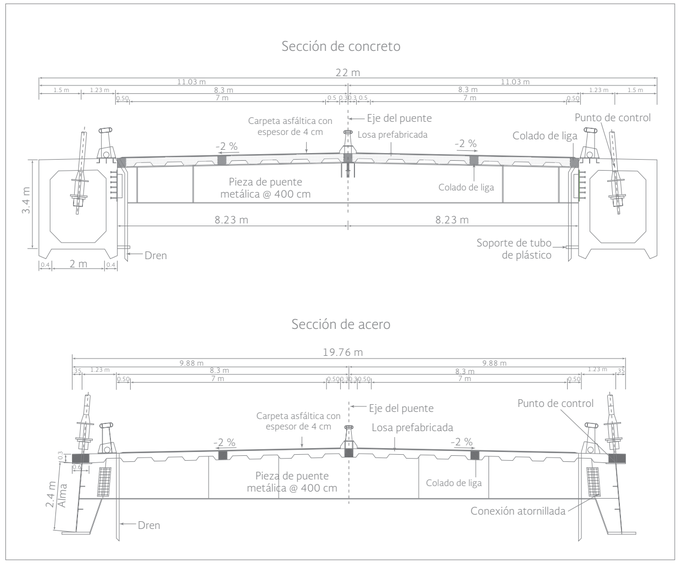
El río Baluarte, que señala el límite de los estados de Durango y Sinaloa en un tramo de su curso de más de 50 km de longitud, con un cañón de gran profundidad por donde corre de norte a sur el cauce, representaba el obstáculo topográfico más difícil de vencer para el trazo de la autopista. Si se dibuja una línea recta entre Durango y Mazatlán, no hay forma de evadir la necesidad de cruzar dicho río, por lo cual la primera decisión importante fue elegir el punto para realizarlo. Se buscaron aquellos lugares donde el cauce estuviera lo más encañonado posible, con una distancia entre bordes en torno al medio kilómetro. Finalmente se eligió un sitio a unos 2 km al sur del punto en el que la corriente comienza a marcar el límite estatal, donde las aguas corren en dirección noroeste-sureste en un ángulo de 30°, en relación con el eje norte-sur, a 738 msnm, con un ancho medio de 20 m. En ese lugar las laderas montañosas –paredes casi verticales– forman un cañón de más de 300 m de altura, y en esta elevación de 1040 msnm, presentan una separación de 330 m entre sí. En ese lugar, la margen derecha remata en una elevación cónica el cerro de La Olla, cuya cima asciende hasta los 1168 msnm, en tanto que en la margen izquierda, que se eleva unos 300 m casi verticalmente, en lo alto remata en una serie de terrazas escalonadas.

En relación con el trazo de la autopista, se dice que el puente se ubica en la estación km 157 + 400; a decir de la nomenclatura convencional de la ingeniería de caminos, justo en el límite entre los dos estados.

El importante eje carretero Matamoros-Mazatlán concluyó con la construcción de la autopista Durango-Mazatlán y lograrse así la conexión entre los estados de Sinaloa, Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Texas, este último en Estados Unidos de Norteámerica. Esto convierte a Mazatlán en el principal puerto del noroeste mexicano que ha logrado una apertura hacia los mercados asiáticos. Esta magna obra representa un portento de la ingeniería mexicana con características y técnicas nunca antes vistas, equiparable, en grado de dificultad, únicamente con algunas carreteras construidas en Chile a lo largo de la cordillera de los Andes.


Elevaciones en metros snm
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
Estribo No. 1
Pila No. 2
Pila No. 3
Pila No. 4
Pilón No. 5
Pilón No. 6
Pila No. 7
Pila No. 8
Pila No. 9
Pila No. 10
Pila No. 11
Estribo No. 12
Dovela de cierre
Perfil por el eje de trazo
Margen izquierda
Margen derecha
A Durango
A Mazatlán
1,124 m
44 m
68 m
68 m
70 m
520 m
54 m
56 m
72 m
72 m
60 m
40 m
Profundidad de la barranca = 390 m
Río Baluarte

El primero y más difícil de los retos confrontados por los ingenieros fue la geografía de la Sierra Madre Occidental que tornaba muy complejo su acceso, principalmente en el sitio conocido como el Espinazo del Diablo, que abarca un tramo de 10 km y cimas de hasta 2400 msnm. Esta situación desembocó en la construcción de 22.83 km de vías adicionales, desde la comunidad de El Palmito, la cual implicó la remoción de hasta el sitio donde se llevaría a cabo la mega obra, removiendo así más de 900 mil metros cúbicos de tierra.



Estudios preliminares

Se realizaron los estudios topográficos, geológicos, geofísicos y geotécnicos propios del caso. En cuanto al primero, dada la importancia del proyecto, se consideró una franja de 120 m de ancho con relación al eje tentativo de trazo del camino, de 1140 m de longitud. El estudio incluyó vuelos a baja altura, que permitieran obtener mosaicos fotográficos para realizar una restitución fotogramétrica suficientemente detallada. Gracias a los estudios topográficos se decidió la ubicación definitiva de los pilones para el tramo atirantado, ligeramente distintos de la planteada inicialmente.

El estudio geológico reveló que en el terreno predominan las rocas ígneas extrusivas, de composición riolítica. El relieve es sumamente accidentado, con abundancia de cantiles verticales que generalmente resultan de derrames de lava riolítica e ignimbritas ocurridos en el remoto pasado. El punto donde se proyectaba localizar el puente presenta dos macizos rocosos sometidos a intensas solicitaciones tectónicas por causa de un cuerpo granítico que aflora en las inmediaciones. En los puntos donde se desplantarían los apoyos se encontraron rocas duras y compactas, tobas e ignimbritas de composición riolítica sobre todo, de textura piroclástica. De los estudios hechos *in situ* (de refracción sísmica y resistividad eléctrica), más las pruebas de laboratorio se pudo apreciar que las excavaciones para la cimentación no enfrentarían problemas por inestabilidad de los taludes. Sin embargo, en el lecho del río se pudo apreciar que hay grandes bloques de roca, desprendidos de las paredes de cantiles aledaños, formadas por grandes columnas de roca de precaria estabilidad. En consecuencia, se consideró que tales desprendimientos podrían presentarse en los taludes de las excavaciones.

De mayo a septiembre de 2003 se hicieron las perforaciones con una profundidad de hasta 45 m, como parte del estudio geotécnico respectivo. Obtener estas muestras representó un gran esfuerzo, por lo aislado y accidentado de la zona; sirva como ejemplo la necesidad de trasladar dos bombas de agua de alta potencia, a fin de tomar agua del río y elevarla a puntos hasta 400 m por encima del nivel del cauce, a un lugar que hasta pocos meses antes era inaccesible, excepto a pie o a lomo de mula. Las pruebas de laboratorio confirmaron las apreciaciones resultantes de los estudios

geológico y geofísico. Determinante para el proyecto fue la comprobación de que el punto elegido presenta roca competente, de baja deformabilidad y adecuada resistencia, de lo cual se podía concluir que la estructura se podría cimentar mediante zapatas simplemente apoyadas, toda vez que las fosas de cimentación tuvieren la profundidad suficiente para dejar atrás las capas superficiales, menos capaces, y se situaren a suficiente distancia de las caras de las laderas para asegurar el correcto confinamiento e inmovilidad. Las capacidades de carga admisibles variaron de 75 a 110 kg/cm^2. Los factores de seguridad a aplicar no serían menores de 3 y los asentamientos no excederían en ningún caso los 30 mm, esperándose que ocurrieran en su mayor parte durante la construcción.

No obstante que el proyecto se ubica en la zona B de la regionalización sísmica definida por el Servicio Sismológico Nacional, donde se estima que el nivel de riesgo por terremoto es medio, se realizaron estudios de riesgo sísmico.

Paralelamente, desde 2003 se comenzó con el estudio de los efectos que el viento tendría sobre la estructura, las consideraciones de cálculo estructural que habrían de tomarse a fin de asegurar la estabilidad de la estructura y las medidas de diseño que debían adoptarse, a efecto de aminorar los efectos nocivos. Dadas las condiciones topográficas, se decidió que, independientemente de los análisis de cálculo numérico, también se harían pruebas de modelos en un túnel de viento. Los primeros estudios se hicieron con un modelo de la sección que se le daría al tablero o calzada de rodamiento en el tramo central del puente. Esto permitió determinar los coeficientes de carga estática para un amplio espectro de velocidades y ángulos de incidencia de corrientes de dos tipos, flujo suave y flujo turbulento. Cuando se tuvo un diseño de proyecto definitivo, se realizaron pruebas aeroelásticas con un modelo completo de la estructura, a fin de ratificar el diseño estructural, verificar su estabilidad en caso de vientos fuertes y comprobar la efectividad que habrían de tener las medidas recomendadas por las pruebas sobre el modelo de sección. Se consideraron velocidades de hasta 150 km/h. Ambos estudios se hicieron en instalaciones del extranjero, Francia y Canadá, respectivamente.

Alternativas

La magnitud de esta estructura justifica la descripción de las cuatro alternativas que también se propusieron a la SCT, antes de llevar a cabo el proyecto ejecutivo.

La primera solución era un puente con una longitud total de 997 m, con el viaducto de acceso izquierdo con cuatro claros, uno de 45 m y tres de 60 m, el claro principal atirantado de 520 m y el viaducto de la margen derecha con dos claros de 60 m y otros dos de 66 m. Los pilones para los tirantes se diseñaron en forma de A y los tirantes se colocarían sobre un plano único.

La segunda solución consideraba una longitud total de 958.25 m. El viaducto izquierdo sumaría tres claros, uno de 38.5 m y los dos restantes de 73.5 m, el claro principal se extendería 490 m y el derecho se compondría de cuatro claros (de 111.25 m, 73.5 m, 63 m y 35 m respectivamente).

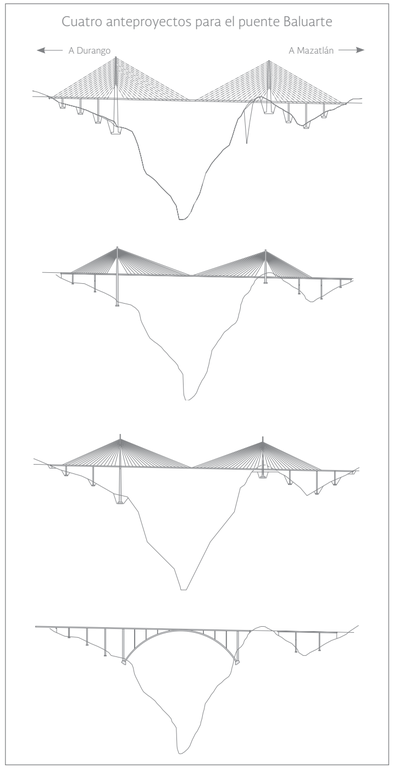
La tercera alternativa de puente atirantado resultó la más larga, 1,000.50 m. El viaducto izquierdo tendría tres claros, uno de 50 m y dos de 90 m; el tramo atirantado cubriría 475 m, y el viaducto derecho comprendería cuatro claros, dos de 90 m y otros dos de 60 m. La subestructura emplearía dos tipos de pilas: cajón de concreto rectangular en los viaductos y cajón de sección celular para las pilas del tramo atirantado.

La alternativa de arco era la más corta, solamente 642 m. El lado izquierdo sumaría cuatro claros, uno de 42 m y tres de 60 m; el arco se extendería 380 m y el acceso derecho tendría un claro único de 40 m. La razón de que la longitud fuera más reducida, era que situaba la calzada de rodamiento a una altura tal que se hacía necesario practicar un corte en la cima del cerro de La Olla y complementar el cruce del río Baluarte con un segundo puente de 195 m, compuesto por tres tramos, 58.5 m en los extremos y 78 m el central.

Solución adoptada

Analizados los factores a favor y en contra de las alternativas, finalmente se eligió una solución que en lo esencial se conformó de un segmento central atirantado, tipo abanico modificado, y dos viaductos de aproximación. La longitud total ascendió a 1 124 m. El acceso izquierdo, de 250 m de longitud total, suma cuatro claros; inicial de 44 m, dos de 68 m y un adyacente al central, de 70 m. El acceso derecho conecta la cúspide del cerro de La Olla, donde se apoya uno de los pilones del tramo atirantado, con el resto de la autopista mediante un viaducto de seis claros: 54 m, 56 m, 72 m, 72 m, 60 m y 40 m. El segmento atirantado se extiende 520 m. En tangente se desarrollan 1005 m de la trayectoria total. Los tramos adyacentes a los estribos y el tramo siguiente, por el acceso derecho, son curvos. En sentido vertical, el puente presenta una pendiente constante de 5% y salva una altura de 56 m, desde su inicio por la margen izquierda, a 1 156.15 msnm, hasta su conclusión por la derecha. Esta alternativa permitió librar la cima del cerro de La Olla.

La distancia vertical máxima entre la calzada de rodamiento y el terreno es de 390 m, lo que lo convierte en el puente más alto de todo México y en uno de los más altos del mundo. Como referencia de lo que esta dimensión representa, sirva mencionar que en la



Perfiles de las cuatro opciones de anteproyecto que antecedieron al proyecto definitivo presentadas a la SCT, para el puente Baluarte. Tres consideraban un tramo central atirantado y la restante, un arco de concreto para el mismo tramo central; en todos los casos, se complementaba la aproximación al tramo central con viaductos por ambas márgenes, la izquierda en dirección a Durango y la derecha, hacia Mazatlán. La primera solución tenía el claro más largo de las cuatro alternativas, 997 m. En la segunda disposición se invertiría para el tramo atirantado, con trabes maestras de acero y vigas transversales de concreto reforzado, y conservaría características similares al primero. En la tercera alternativa la longitud total de puente era la más larga, 1,000.50 m. En la alternativa de arco se presentaba el tramo central más corto, tan sólo 642 metros.

actualidad, hay en el mundo sólo 12 rascacielos que superan esa dimensión (se considera sólo la altura del inmueble propiamente dicho, sin las antenas que pudiese tener). El peso total de la estructura asciende a 273 478 toneladas, de las que poco menos de la décima parte (22 mil toneladas) son acero, mientras el resto, 114 308 m³ corresponden a concreto armado.

Trabajos preparatorios

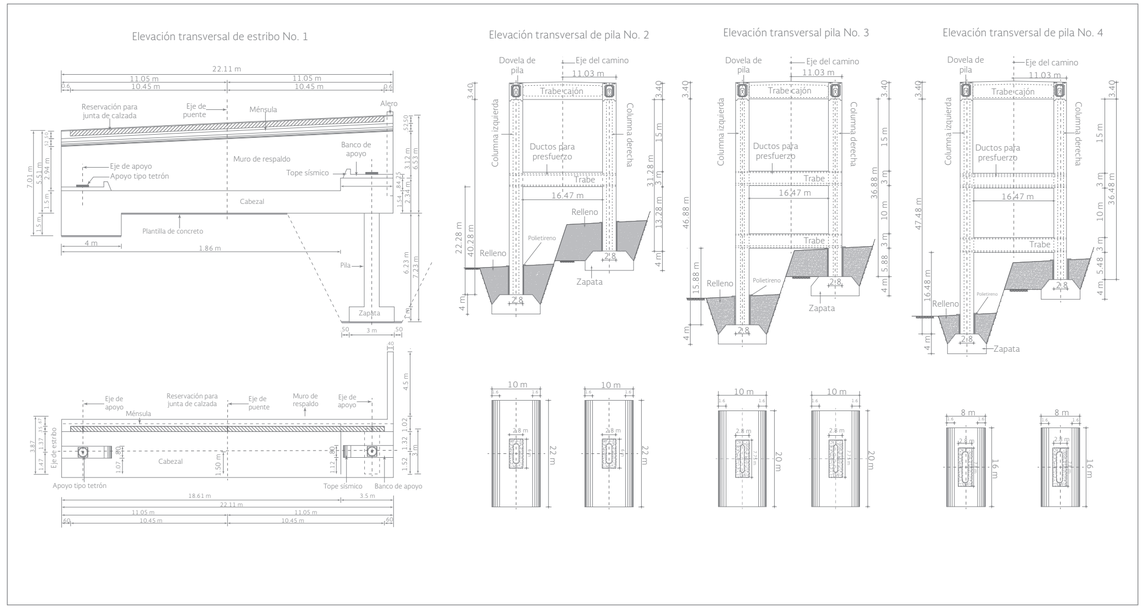
Sobre la carretera federal No. 40, que también corre de Durango a Mazatlán, a unos 8.5 km en línea recta del sitio de obra, se ubica el poblado de El Palmito. Desde éste se construyó un camino de acceso, cuyo desarrollo hasta el apoyo No. 12 creció hasta 14 km, por lo accidentado del terreno en Sinaloa. El camino presenta un desvío en el km 13, que se prolonga casi 10 km hasta el frente de construcción sobre la margen izquierda. Además de servir los frentes de obra del puente, el camino también fue acceso a los frentes de ataque de un par de túneles a corta distancia del puente mismo.

Para salvar el cauce del Baluarte se instaló un puente provisional, empleando trabes de concreto pretensado AASHTO tipo IV, con dos claros y una longitud total de 60 m. Se generalizó la costumbre de designarlo con el apodo de "El Baluartito". Además, fue necesario acondicionar 32 obras de drenaje, para asegurar su permanencia en temporada de lluvias.

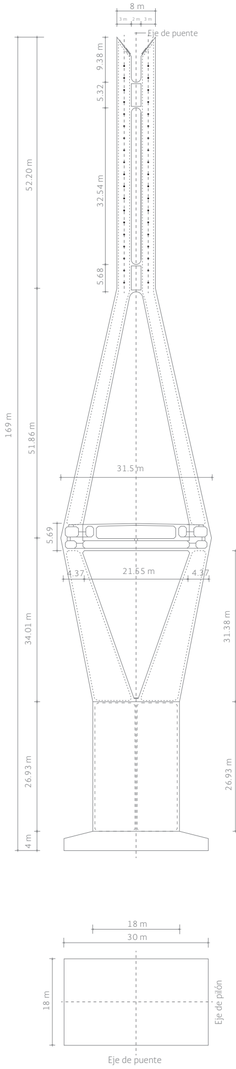
Se instaló una planta de fabricación de concreto en la bifurcación mencionada. El campamento de obra se ubicó en el km 16+020 del desvío hacia el frente de Durango, sobre la margen derecha a pocos metros del puente provisional. Este campamento creció hasta comprender más de 30 estructuras, entre almacenes, talleres, oficinas, alojamiento, zona para alimentación y para entretenimiento del personal.

Subestructura

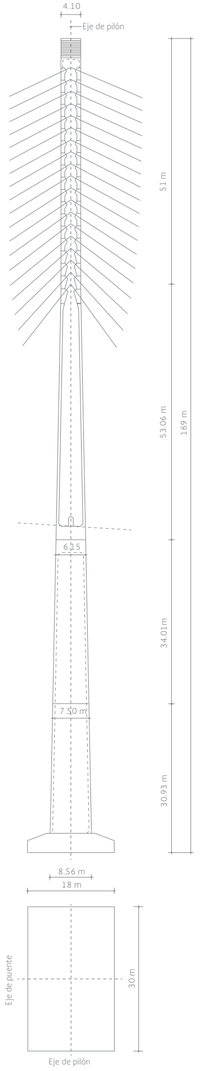
Los ocho apoyos intermedios para los tramos de viaducto (números 2 a 4 y 7 a 11) descansan en zapatas de cimentación, fabricadas con concreto f'c = 250 kg/cm² y acero de refuerzo f'y = 4 200 kg/cm². Si bien todas



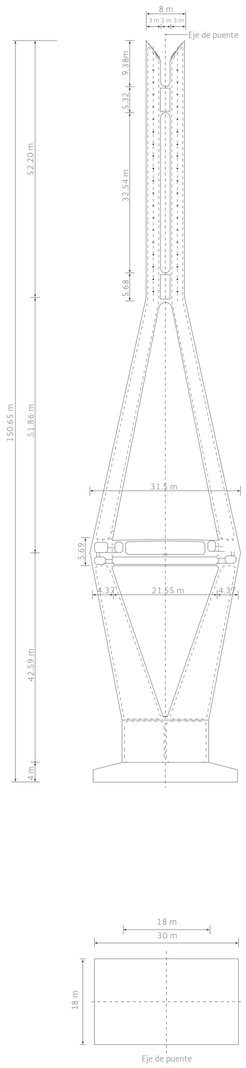
Vista transversal pilón No. 5



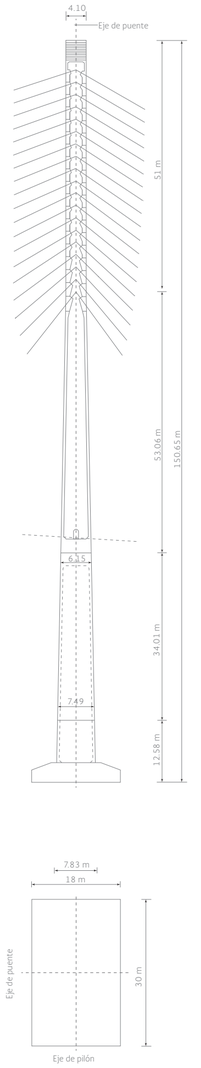
Vista longitudinal pilón No. 5

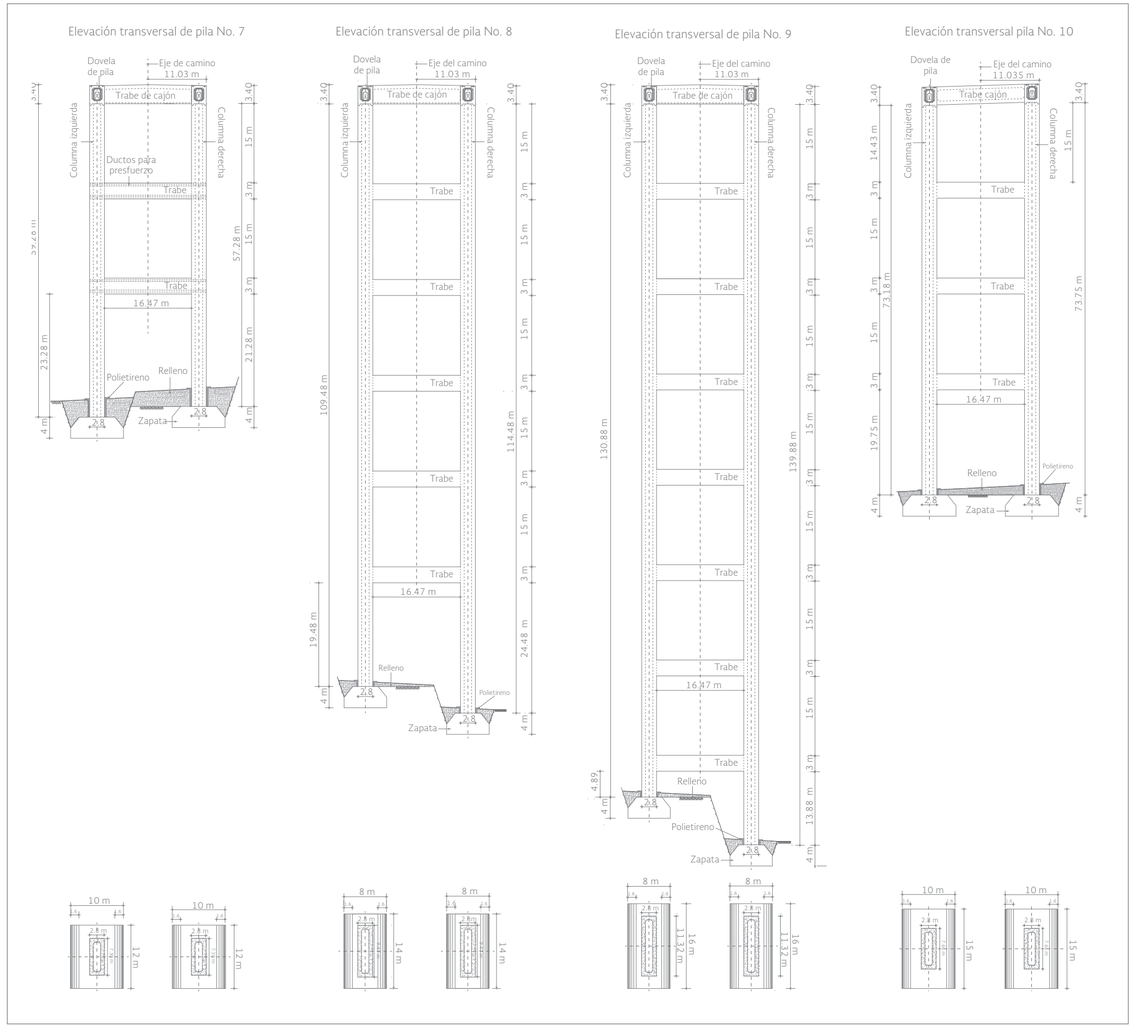


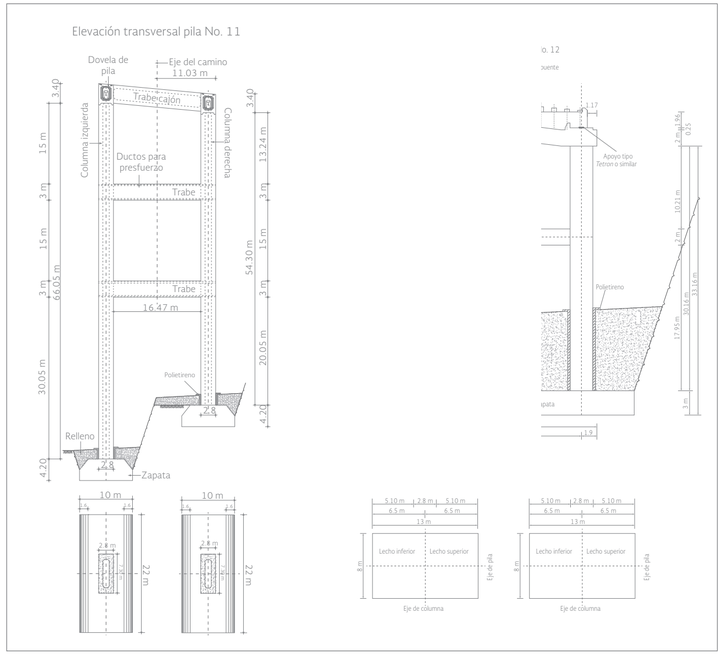
Vista transversal pilón No. 6



Vista longitudinal pilón No. 6







esas zapatas tienen un peralte de 4 m, la dimensión de superficie es propia, variando desde 144 m² hasta 220 m². Se determinó casuísticamente que la resultante de las distintas combinaciones de carga que pueden solicitar a determinado apoyo (por ej. viento y sismo simultáneos) pasaran a una distancia no mayor a la cuarta parte de cualquiera de las dos dimensiones de la zapata (ancho o largo), medida desde el centro geométrico. Otra especificación aplicada al diseño de la cimentación fue que la distancia horizontal desde cualquier borde de una zapata hasta la superficie de la ladera más próxima no sería menor a una vez y media la dimensión mayor de la zapata, pues sería ese grado de incrustación en la masa rocosa lo que aseguraría el confinamiento permanente de la zapata respectiva dentro de dicha masa y evitaría depender de las capas de roca descomprimidas, más próximas a la superficie, donde ocurren las fracturas y alteraciones.

Dichas pilas consisten en marcos de concreto, con columnas paralelas a 16.47 m de distancia entre ejes, cuya altura se determinó por separado según la condición topográfica de su ubicación exacta y la profundidad de excavación necesaria para encontrar roca capaz. La sección de las columnas es de cajón rectangular con paredes de 70 cm de espesor, más no constante. Transversalmente, se mantiene la dimensión de 2.80 m; pero longitudinalmente adoptan el perfil de pirámide truncada que invariablemente remata en una corona de 5.50 m. Las pilas cuentan con travesaños dispuestos a distancias en torno a los 18 m entre ejes, cuya cantidad se decidió según la altura total y las solicitaciones estructurales de cada caso. Su sección es de cajón de concreto de 3 m de peralte y dimensión horizontal según lo determina la columna. Estos travesaños van postensados transversalmente en las cuatro esquinas. Sobre la corona de cada columna se fabricó

El proyecto consideró armados muy cerrados en los cuerpos de pilas, riostras y zonas de presfuerzo de las mismas, lo que hizo complicada la colocación del concreto. Para solucionar este problema se diseñó un concreto con agregados y revenimientos especiales, a fin de que fluyera por toda la sección y evitar la formación de oquedades.

El tramo central quedó conformado por 37 dovelas formadas por dos trabes laterales armadas con acero estructural ASTM709 grado 50 sección I, unidas mediante piezas de puente a cada 4 m sobre las que se colocó un larguero como cimbra perdida. Después se posicionaron los montenes y sobre éstos se realizó el colado de concreto hidráulico para generar la losa. La instalación de los anclajes comenzó una vez que la construcción del pilón lo permitió. Por medio de la grúa torre se levantó el anclaje desde la zona de almacenamiento provisional en el tablero. A la torre grúa se le adicionó el huinche eléctrico de 500 kg (con cable de 50 m); se hizo el anclaje y fue elevado hasta la sección vertical del mástil para colocarlo en su posición final.

un cabezal, compuesto por dovelas de pila de 3.40 m de peralte, las que posteriormente ensamblarían con las dovelas de la superestructura descritas más adelante, más un último travesaño cuyo peralte crece hasta 3.62 m al centro, a fin de proporcionar una cumbrera o parteaguas para que la losa de la calzada de rodamiento contara con pendiente de desagüe hacia los costados. Las pilas se fabricaron de concreto con dos grados de resistencia; $f'c = 350\ kg/cm^2$ para columnas y travesaños y $f'c = 500\ kg/cm^2$ para los cabezales. En el presfuerzo se empleó acero $f'y = 19\,000\ kg/cm^2$. En el caso de la columna de mayor altura (en la pila No. 9, costado aguas abajo, de 147.28 m) se requirieron ocho travesaños (incluido el de remate) separados 18 m. La cara inferior del más bajo quedó entre sí a sólo 4.88 m de la zapata más superficial, que era la de la columna aguas arriba. El fuste de esta columna aumenta su cara lateral desde la dimensión estandarizada de 5.50 m en la corona hasta 11.72 m en el arranque donde toca la zapata de cimentación.

El apoyo número 1 (propiamente el estribo de la margen izquierda), consiste en una losa horizontal, sobre la cual se practicó un relleno para obtener el peralte necesario a la calzada. Por el costado aguas abajo la losa cuenta con un muro de apoyo sustentado sobre una zapata corrida de 1 m de peralte. El otro estribo (apoyo No. 12) es una estructura similar a las pilas descritas previamente, con postes paralelos, un travesaño y un cabezal, que en este caso corre inclinado como lo pide el peralte de la curva carretera. Su altura media es de 30.5 metros.

Los apoyos 5 y 6 son los pilones que reciben los tirantes; el primero es de 169 m de altura y el segundo de 150.65 m. La forma de estos apoyos, desde la zapata hasta la calzada, corresponde a una Y, donde la diferencia de alturas mencionada se toma mediante la altura del trazo vertical. Los brazos de la Y se extienden hasta una altura de 31.38 m y rematan en un travesaño de 5.69 m de peralte y 31.32 m de ancho total. Por encima del travesaño se levantan los mástiles, cuya forma corresponde a una Y invertida.

La convergencia de los brazos de la Y ocurre a 49 m por encima de la calzada de rodamiento y desde ese punto se levantan dos postes paralelos, de 52.20 m de altura, unidos en su arranque y a 80% de la altura total mediante travesaños de 5.32 m de peralte. En estos mástiles convergen los tirantes, dispuestos en cuatro superficies alabeadas que arrancan en los costados de la calzada de rodamiento. Estos apoyos se fabricaron con concreto reforzado de la misma especificación, ($f'c = 350\ kg/cm^2$).

Superestructura

Consta de dos tipos de estructura. Para los segmentos de viaducto se emplearon dovelas mixtas, conformadas por vigas maestras de cajón de sección constante, fabricadas con concreto $f'c = 500\ kg/cm^2$, que se unen transversalmente mediante vigas de acero estructural grado 50, espaciadas a cada 4 m y se rigidizan horizontalmente mediante la losa de concreto con $f'c = 400\ kg/cm^2$. El número total de dovelas empleadas para el acceso derecho fue de 68, mientras que por el izquierdo ascendió a 102.

Dovelas de este mismo tipo se emplearon en el claro principal, para sendas secciones de 44 m de longitud contiguas a los pilones. El resto de los 432 m de dicho claro se cubrió mediante 36 dovelas metálicas, compuestas por vigas maestras de sección I, con el alma ligeramente inclinada y rigidizada horizontalmente con dos atiesadores, los cuales se unieron transversalmente mediante tres vigas, espaciadas a la distancia dicha. La losa de concreto y la placa de acero empleada tenían todas las mismas funciones y atributos ya mencionados.

Como ya se comentó, la disposición de los tirantes es de abanico modificado; es decir, que si bien las trayectorias de los tirantes no son paralelas, su conver-

Como parte del sistema de puente atirantado, se complementó un tramo contiguo a cada lado de los mástiles 5 y 6, fabricado con dovelas de concreto armado con un total de 44 m de longitud.

Arriba: Viga lanzadora. Esta estructura es el elemento principal en el procedimiento constructivo del tablero metálico del claro central. Con este equipo se realizó el lanzado de dovelas metálicas, permitiendo mantener la dovela en el espacio y solucionar la conexión. **Enfrente:** El Carro de Avance Colgante "Baluarte" fue desarrollado específicamente para la construcción del tablero de concreto del puente. En cada viga longitudinal de concreto se contó con uno de éstos que fue operado independientemente de acuerdo con la secuencia de construcción del proyecto.

gencia con el mástil no es en un punto único sino a lo largo de su trayectoria vertical. En alzado longitudinal, la disposición tampoco es simétrica. A partir de cada pilón, los tirantes se reparten en una distancia de unos 250 m hacia el claro central, mientras que hacia los estribos lo hacen solamente en una distancia de unos 180 metros.

El puente cuenta con un total de 152 tirantes, distribuidos en ocho grupos de 19 cables cada uno, fabricados *ex profeso* con hilos de acero galvanizado de Ø 15.7 mm, LR = 17 700 kg/cm² y protegidos de la corrosión con polietileno de alta densidad y relleno con base en cera petrolera. De los 76 tirantes que corresponden a los cuatro grupos que soportan el claro principal, 72 se sujetan a dovelas metálicas con anclajes fabricados con acero f'y = 4 200 kg/cm², barras *Dywidag* con LE mínimo de = 8 500 kg/cm² y LR = 1 500 kg/cm². Los restantes 80 tirantes, tanto los cuatro adyacentes a los pilones por la cara del claro principal, como los de los cuatro grupos hacia las márgenes, se sujetan a dovelas mixtas mediante anclajes fabricados de concreto postensado de f'c = 350 kg/cm² sobre las trabes maestras.

Procedimiento constructivo

Formalmente inició el 7 de febrero de 2008 con la excavación de las fosas para zapatas de cimentación, de manera más o menos simultánea. Conforme se avanzaba en profundidad, se aplicaron casuísticamente tres tipos de tratamiento a las caras de los taludes: drenes, concreto lanzado con malla de triple torsión e inclusive anclas de fricción. Adicionalmente, se hizo necesario aumentar la profundidad de las excavaciones para las pilas 3 y 4, a raíz de encontrar lentes de arcilla. Alcanzada la profundidad de desplante, se fabricó una plantilla de concreto f'c = 100 kg/cm² para proceder con la habilitación del armado de las zapatas de cimentación. Para la fabricación de las columnas en las pilas de marco se utilizaron cimbras autoportantes. Las primeras pilas en quedar listas fueron las números 2 y 3 (en la margen izquierda) y 10 y 11 (en la derecha), más los estribos. En el caso de las pilas 8 y 9, se contraventearon mediante pares de cables tendidos desde un punto en torno a 75% de la altura total, hasta anclas hincadas junto a las zapatas de las pilas adyacentes (7 a 10); dichas anclas contaban con capacidad de 127 toneladas.

La instalación de los carros para el colado de dovelas en los tramos de viaducto se comenzó en cuanto el concreto del cabezal respectivo fraguó hasta alcanzar 100% de su resistencia. Siguiendo el método de doble voladizo, que consiste en agregar dovelas de dos en dos por las dos caras de una pila a fin de mantener la estructura equilibrada, se colaron las primeras dovelas en cuanto el concreto alcanzó 80% de su resistencia. Se tensaron los cables de presfuerzo, lo que incrementó la capacidad portante de la estructura y permitió desplazar el carro de colado hasta el borde de la dovela recién terminada, a fin de colar la siguiente. Si se considera que todos los claros cuentan con un número impar de dovelas, la de cierre siempre se fabricó eligiendo uno de los dos carros de colado que convergían al centro del claro correspondiente. En rigor, los carros servían para colar segmentos de trabe maestra, no la dovela completa. Conforme estas trabes se prolongaban hacia el centro del claro, se instalaban las vigas de acero transversales, sujetadas a las placas que se acondicionaban en la cara interior de las vigas maestras. Una vez terminada esta instalación, se procedió a colar la losa mediante el procedimiento de lámina acanalada como cimbra muerta, a fin de dar a todo el conjunto de elementos estructurales separados, la posibilidad de trabajar conjuntamente.

Al tiempo que se acondicionaban los viaductos, se avanzó en la construcción de los pilones para el tramo atirantado, cuya forma hacía más complejo el proceso. A fin de evitar deformaciones en los brazos de la Y que constituye la porción inferior, conforme aquéllos crecían, se instalaron travesaños provisionales. Una vez terminado y fraguado el cabezal que une dichos brazos, se instalaron los carros de colado y se continuó con los mástiles. Una vez más, en lo que crecían los brazos de la Y invertida que forma dichos mástiles antes de alcanzar el punto de convergencia, se evitaba su deformación mediante dos puntales por brazo, de 18.5 m y 34.5 m de altura, respectivamente, apoyados sobre el cabezal de la pila.

La instalación de las dovelas metálicas se comenzó en cuanto quedaron listos y atirantados los tramos del claro central fabricados por el procedimiento de doble voladizo descrito anteriormente para los viaductos. Este atirantamiento, a su vez, debía esperar a que la edad del concreto del pilón correspondiente fuera de 45 días mínimo. Para la colocación de las dovelas metálicas se emplearon dos carros de lanzamiento, uno para cada margen, fabricados en Guadalajara y ensamblados en el lugar de la obra. Cada carro consta de un par de armaduras de unos 25 m de longitud (la dimensión aproximada de dos dovelas), montadas en el sentido longitudinal del puente sobre rieles y provistas de tres grúas viajeras, que corren sobre la cuerda superior de las armaduras. Merced a los rieles, las armaduras se pueden desplazar más allá del borde ya terminado de la calzada de rodamiento, a modo de ménsulas. Empleando la grúa viajera, instalada por el extremo en voladizo y previa colocación de contrapesos en el extremo opuesto de las armaduras, se izó y se colocó una nueva dovela. Una vez atornillada a la precedente, se instaló el conjunto de cuatro tirantes que le corresponde (dos hacia el claro principal y dos hacia los viaductos) y los desplegaron a 30% de su tensión de trabajo definitiva. Enseguida se fabricó la losa y en cuanto el concreto fraguó a 80% de su resistencia, fueron tensados los tirantes a 100% El ciclo se repitió una y otra vez hasta cerrar todo el claro.

Controles de calidad

Conforme avanzaba la construcción, sistemáticamente se tomaban muestras de las mezclas de concreto aplicadas, sobre las que se realizaban pruebas de re-

Arriba: El Baluarte es el puente atirantado más alto de América Latina y el tercero más alto del mundo, rivaliza con obras como el puente Sudue, en China, de 400 m de altura, y con el Hegigio, en Nueva Guinea, de 300. **Enfrente:** La dificultad constructiva del puente Baluarte, la metodología de construcción empleada, así como los beneficios en comunicación que brinda junto a la derrama económica en el norte del país, hacen de este espectacular puente una obra en la cual se demuestra que la ingeniería mexicana está a la vanguardia y es reconocida en todo el mundo, lo que llena de orgullo a todos los mexicanos.

sistencia rigurosamente, a una, dos y a cuatro semanas de haberse colado. En el caso de las dovelas, se reservaban otros cilindros de muestra, que servían para las pruebas de contracción a plazo mediano, necesarias para vigilar el resultado que tiene la aplicación de las solicitaciones de presfuerzo sobre los elementos de concreto que no podían cobrar su integridad estructural y su condición de carga, sino hasta que se terminara el puente.

En relación con el control de los elementos metálicos, se dispuso de equipos de especialistas en los talleres de pailería de Monterrey y Guadalajara, que inspeccionaban cada uno revisando la calidad de la placa de acero; su correcto dimensionamiento y la calidad de las soldaduras, mediante inspección visual y pruebas no destructivas. Un equipo adicional *in situ*, verificaba la calidad de los ensambles, fueran con soldadura o con pernos roscados y tuerca.

Instrumentación

Durante la construcción, se instalaron deformímetros de fibra óptica en las vigas puente metálicas, así como inclinómetros, anemómetros y acelerómetros en los pilones 5 y 6. Los registros de desplazamientos verticales a lo largo de los voladizos del tramo principal, y de desplazamientos horizontales en los mástiles y demás puntos selectos se hicieron constantemente de asegurar que los dos voladizos coincidieran al centro del claro principal. También se llevó un registro de la velocidad del viento, así como de las aceleraciones en diferentes longitudes del voladizo principal además de un riguroso programa de calibración de los sensores y de los aparatos de registro, para que los resultados que arrojaran fueran fidedignos.

La estructura misma está equipada con deformímetros y acelerómetros, que permiten evaluar su comportamiento al paso de los años. Estos aparatos se emplearon para las mediciones de comportamiento en las pruebas de carga dinámica, realizadas con vehículos cargados y bajo condiciones controladas, antes de poner el puente en servicio. Estas pruebas permitieron identificar las frecuencias y formas modales de vibración propias de la estructura. Comparadas con las mediciones que se realicen a futuro, permitirán evaluar el estado general del puente y su estabilidad, a lo largo de su vida útil y conforme se vea sometido a las diferentes solicitaciones por tránsito, viento, cambios de temperatura y sismo. Los aparatos instalados permiten transmitir los registros al Centro de Registro y Monitoreo de Estructuras de la SCT, para su almacenamiento y futuro aprovechamiento.

El puente Baluarte se concluyó en marzo de 2012 después de cinco años de construcción y marcó un hito en la historia de los puentes en México.

Puente El Carrizo
2013

EJE TRONCAL
Mazatlán-Matamoros

AUTOPISTA
Durango-Mazatlán

UBICACIÓN
El Salto-Concordia
Km 162+720

ESTADO
Sinaloa

TIPO DE PUENTE: Atirantado

LONGITUD TOTAL: 434.30 m

No. DE APOYOS: 4

No. DE CLAROS: 3

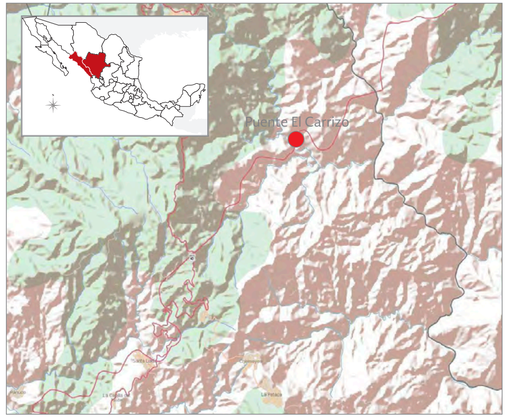
CLARO MÁXIMO: 217 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 166 m

No. DE TIRANTES: 56

ANCHO TOTAL: 18.40 m

No. DE CARRILES: 2



Antecedentes y objetivo

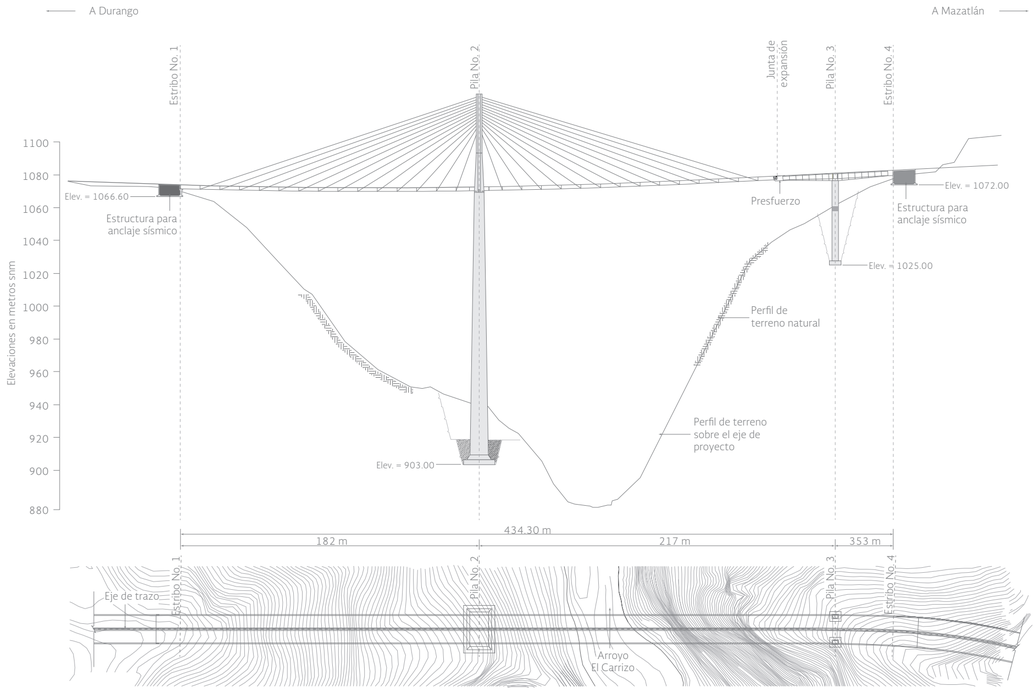
La autopista Durango-Mazatlán es el proyecto carretero más ambicioso e importante realizado hasta ahora en México. Se trata de proporcionar una carretera moderna entre la costa del océano Pacífico y los centros industriales y manufactureros del norte del país y eventualmente, constituir un eje de comunicación entre ambas costas, desde el puerto de Tampico, en el golfo de México hasta el de Mazatlán. En su tramo más complejo, donde cruza la Sierra Madre Occidental entre los estados de Durango y Sinaloa, considera la construcción de siete puentes con más de 90 m de longitud cada uno, además de una cantidad de túneles que excede medio centenar.

Sobre el km 162+720 del trazo, a corta distancia hacia el poniente del límite entre los estados de Durango y Sinaloa, atraviesa el arroyo El Carrizo, una corriente de agua que nace 10 km al noroeste del sitio del cruce; corre sustancialmente hacia el sur y desemboca 5 km aguas abajo en el río Baluarte. El área drenada por dicha corriente en el punto de intersección es de 36 km^2 y forma parte de la región hidrológica 36, según la clasificación de la SARH, la cual catalogó al cauce como "sinuoso, estable y encajonado". Su influencia hidráulica sobre la estructura es prácticamente nula; el régimen climático y su limitada superficie drenada impiden que se trate de una corriente de consideración. El desafío que el puente debió resolver fue netamente topográfico: brindar un medio para librar la barranca en cuyo fondo corren las aguas.

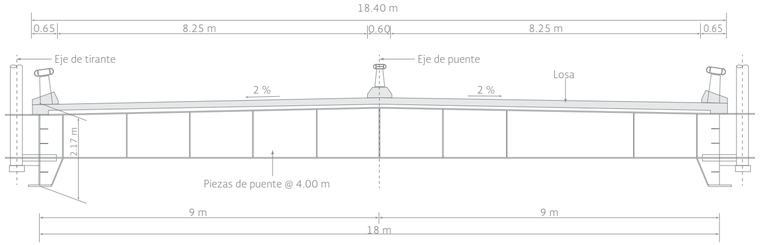
Modificación del proyecto

A mediados de 2008 se había planteado la construcción de una estructura mixta, con la parte principal en doble voladizo, apoyada sobre tres pilas, y por la margen derecha (el extremo hacia Durango), un tramo de viaducto. Los cuatro claros de la estructura en doble voladizo serían uno de 86 m, dos de 140 m cada uno y uno de 65 m más el viaducto, de 34 m, lo que sumaría 465 m en total. El gálibo mayor de la pila 3 alcanzaría 206 m de altura. El peralte total de la trabe de cajón para el doble voladizo variaría de un máximo de 7.80 m en las dovelas de pila a 3.20 m en la de cierre apoyada en uno de los estribos; el número máximo de dovelas ascendería

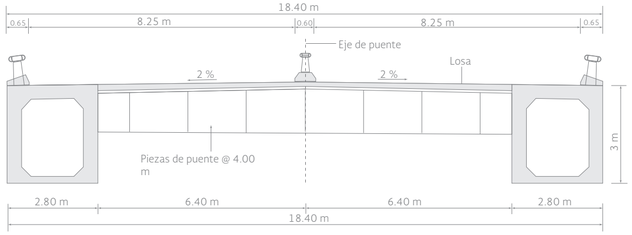
El principal objetivo de la autopista Durango-Mazatlán es crear un eje de comunicación entre los puertos de Tampico y Mazatlán, además de unir la costa del Pacífico con los centros industriales y manufactureros del norte del país. El tramo más complejo es el que atraviesa la Sierra Madre Occidental. Fue en ese lugar donde está levantado el segundo puente atirantado de la moderna autopista El Carrizo.



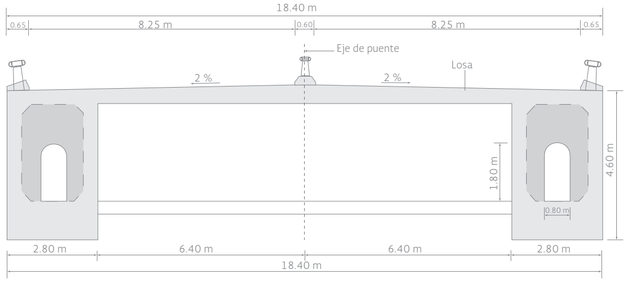
Sección transversal pila No. 2



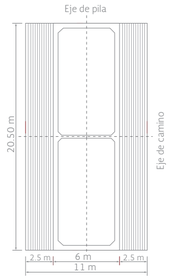
Sección transversal mínima pila No. 3



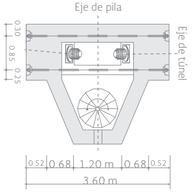
Sección transversal máxima pila No. 3



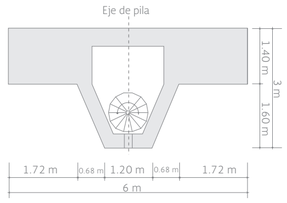
Sección transversal de pila No. 2



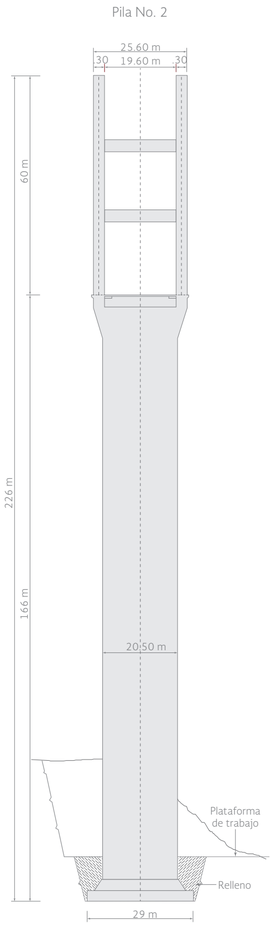
Corte A



Corte B



Pila No. 2



El pilón en el cual se sostiene el atirantado fue realizado en su totalidad con concreto armado. Tiene una altura de 166 m y descansa sobre una zapata de 19x29 m. La sección de este pilón es de doble tubo. Las paredes perimetrales tienen un espesor de 45 cm, mientras que las de la costilla interna son de 30 cm.

a 20; el ancho total de la calzada sería de 17.66 m, con cuatro carriles de circulación.

Sin embargo, este proyecto se tuvo que replantear por el descubrimiento de planos de fallas geológicas desfavorables, con extensión y tamaño tales que resultaba inviable asegurarlas mediante el tratamiento de taludes. Además, se encontró evidencia de gran inestabilidad de las estructuras rocosas, por megalitos desprendidos desde la parte más alta de los cantiles, representando un riesgo potencial para la integridad de la subestructura.

El cambio sustancial al proyecto fue para salvar una falla geológica. Se optó por levantar un apoyo casi al centro del claro total, sobre la misma margen derecha de la corriente, que funcionaría como mástil para un puente atirantado de 364 m de longitud. La distancia restante se cubrió con una estructura en doble voladizo de 70.6 m, cuyo apoyo está prácticamente en el mismo punto donde se situó el apoyo 5 del proyecto inicial. Entre ambas estructuras suman una longitud de 434.6 m. El aspecto más notable de este proyecto es que la altura total del mástil para el tramo atirantado es de 226 m, lo que lo convierte en la segunda estructura más alta para puentes en todo México (y una de las diez más altas de todo el mundo), superada en nuestro país sólo en 7% por el mástil más alto del puente Mezcala, en la Autopista del Sol.

Subestructura

Como ya se dijo, el puente consiste en dos tramos con sus respectivos tipos de estructura, atirantada y en doble voladizo. El pilón para el tramo atirantado, realizado enteramente de concreto armado, consta de una pila de 166 m de altura (incluida la zapata de cimentación) que en el sentido transversal mantiene la dimensión de 20.5 m y disminuye en sentido longitudinal de 11 m a 6 m. La sección es de doble tubo, con 45 cm de espesor para las paredes perimetrales y 30 cm para la costilla interna, que separa los tubos. Descansa sobre una zapata de 19 x 29 m de superficie, en un terreno cuya capacidad de carga se determinó en 80 t/m^2. Para realizarlo se excavó una fosa que por el talud ladera arriba alcanzó 43 m de profundidad; una vez terminada la construcción, la fosa se rellenó hasta 15 m por arriba del nivel de desplante de la zapata y se dispuso de una plataforma de trabajo de unos 40 m por lado.

En la corona, la pila se ensancha hasta 25.60 m, a fin de brindar apoyo a los mástiles que reciben los tirantes. Dichos mástiles ascienden paralelos, con una altura de 60 m, y van atiesados por dos travesaños, a tercios de la altura total, ambos de sección cuadrada de 3.20 m. Dichos mástiles presentan sección de T o cruz griega, donde el cuerpo de la cruz, cuya dimensión total es de 3 m y permanece constante, aloja una escalera helicoidal de servicio. En alzado longitudinal, los brazos de la cruz disminuyen de 6 m en el desplante, a 3.60 m a la altura del primer travesaño, desde donde continúan con sección constante hasta la altura total.

El tramo en doble voladizo descansa sobre una pila en forma de H, apoyada sobre un par de zapatas de 9 x 6 m y con sección rectangular constante de 4.00 x 2.80 m. La altura de las columnas es de 51 m y la separación a ejes entre ambas, de 15.60 m. Se apoyan sobre un terreno cuya capacidad de carga admisible se determinó en 120 t/m^2. Cabe mencionar que la profundidad de la fosa excavada para alcanzar el nivel de desplante oscila en torno a los dos tercios de la altura total de la pila.

En cuanto a los estribos, ambos son estructuras similares: grandes cajones de concreto rellenos de material selecto con peso volumétrico de 1.8 t/m^3, empotrados en el terreno mediante cables de presfuerzo. El estribo de la margen izquierda presenta, en sentido transversal, una sección en T o cruz griega, con una altura total de 7 m y el ancho de 18.40 propio de la calzada de rodamiento. El cuerpo de la cruz, conformado por dos paredes de 40 cm de espesor y separadas 9 m entre ejes; los brazos se forman con sendos tubos de sección rectangular, con unos 3 m de peralte. En sentido longitudinal, este estribo mide unos 13.50 m; las medidas son aproximadas, pues la estructura presenta salientes adicionales, que hacen las veces de zapatas de cimentación. Este estribo cuenta al centro con un muro de 160 cm de espesor, donde se alojan cinco pares de cables que lo anclan al subsuelo, dispuestos en igual número de inclinaciones, que varían 5° de una a otra, desde 10° hasta 30°. El mismo muro recibe los cables de presfuerzo que sujetan el extremo del tramo de puente atirantado.

El estribo de la margen derecha es de forma más sencilla, con dimensiones aproximadas de 15 m entre paredes en el sentido longitudinal, 10 m de profundidad y 18.40 m de ancho total. La fijación del estribo al terreno se realiza mediante cuatro pares de cables de presfuerzo insertados verticalmente. La sujeción de la estructura del puente al estribo fue mediante cinco pares de cables cuyos ductos corren ahogados por el cabezal de los muros laterales del cajón, una masa de concreto con una sección rectangular del orden de 4.00 x 2.80 metros.

Superestructura

El tramo atirantado suma un total de 31 dovelas, distribuidas como a continuación se desglosa: al centro, la dovela de pila, de 12 m de longitud; enseguida, en ambas direcciones, 14 dovelas sujetas por sus respectivos tirantes, con 8 m de longitud las dos adyacentes a la de pila y 12 m las 13 restantes. A los extremos, las dovelas de empotre, ambas de 12 m de longitud.

Las dovelas, fabricadas con placa de acero estructural A-709 grado 50, consisten en dos vigas maestras sección I laterales, con alma de 1 830 x 19 mm, donde el patín superior es otra viga sección I acostada, hecha de placa de 457 x 19 mm y sendos patines de 203 x 19 mm, mientras el inferior consta de una placa de 610 x 50 mm (cabe observar que por tratarse de la dovela de pila, estas características varían ligeramente); por la cara interior, las almas presentan cuatro atiesadores horizontales, fabricados con placa de 203 x 19 mm. Las vigas maestras se unen entre sí mediante travesaños o vigas de sección I cuyo peralte varía de 1280 mm al centro a 1112 mm en el punto donde se ensamblan con la preparación correspondiente de la viga maestra. Cada travesaño cuenta con 11 atiesadores verticales, dispuestos a 1 680 mm unos de otros, de 152 x 13 mm cada uno. La cantidad de travesaños varía según la dimensión longitudinal de la dovela; pero en todo caso, están dispuestos en posición tal que una vez ensamblada la serie de dovelas, estos travesaños quedan equidistantes entre sí, a una distancia de 4 m. La cuerda superior de la dovela se rigidiza horizontalmente gracias a la losa para la calzada de rodamiento, en tanto que por la cuerda inferior se dispusieron diagonales, a fin de formar una armadura tipo *Warren*.

El tramo atirantado se sostiene mediante dos planos de 28 tirantes (4 arpas con 14 tirantes cada una), tendidos simétricamente en torno al mástil, en disposición de abanico modificado. El número de torones por tirante va creciendo del centro señalado por el mástil, hacia los extremos: 22 torones para las dovelas numeradas 1 a 4; 25 para la número 6; 28, 31 y 34 para las numeradas 7 al 12, aumentando de par en par de dovelas: 37 para las número 13 y 48 para las número 14.

El tramo en doble voladizo consta de una dovela de pila de 8 m de longitud, siete dovelas de 4 m de longitud en ambas direcciones más otras dos de empo-

El tramo atirantado tiene un total de 31 dovelas, de las cuales, 14 están sostenidas por 28 tirantes, tendidos de manera simétrica respecto del eje del pilón. El número de torones en cada tirante va aumentando del centro del mástil a los extremos.

tramiento. La que conecta con el tramo atirantado e incluye la junta de expansión tiene una dimensión nominal de 5.40 m (incluidos los 2.10 m de la junta) y la que empotra con el estribo de la margen derecha, 3.30 metros.

En cuanto al tramo de doble voladizo, la dovela de pila consta de dos vigas maestras coladas en concreto, con sección constante de 4.60 m de peralte y 2.80 m de ancho, donde la cuerda inferior es una losa de 1.20 m de peralte y las paredes restantes, de 44 cm de espesor; ambas vigas están unidas entre sí por losas superior e inferior, de 44 cm y 40 cm de peralte, respectivamente. Las dovelas en doble voladizo son elementos mixtos; constan de vigas maestras de concreto, que en sentido horizontal prolongan las dimensiones de la dovela de pila, aunque disminuyen progresivamente el peralte total hasta 3 m, unidas transversalmente por travesaños de placa de acero, con características y dimensiones similares a las ya descritas para las dovelas del tramo atirantado.

La longitud total del puente cuenta con una losa de 20 cm de peralte, salvo el tramo que corresponde a la dovela de pila de la sección en doble voladizo. Sobre ésta se colocó el pavimento.

Para mejorar el desempeño de la estructura ante el empuje del viento, en especial sobre el tramo atirantado, se instalaron aeroestabilizadores a lo largo de las caras verticales de las dovelas. La instalación y tensado de los tirantes fue realizado una vez que el fraguado del concreto lograba la resistencia especificada.

El cálculo estructural consideró como cargas vivas tres tipos de camión: HS-20 de tres ejes, T3-S3 de seis ejes y el de mayor tamaño, tipo T3-S2-R4; es decir, tractor y dos remolques, con un total de nueve ejes, 72.5 toneladas de peso total y descarga máxima de 8.4 toneladas por eje, distribuida en una longitud de 20 m con peso total de 32.67 toneladas.

Calzada de rodamiento

De la longitud total que el puente abarca, 383 m corren en tangente; esto, considerando el plano horizontal de la trayectoria carretera. Por la margen derecha (el extremo hacia Mazatlán), restan 51 m que se desarrollan en curva. En sentido vertical, la trayectoria es más compleja, pues el puente toma casi la totalidad de la curva convexa que resuelve la transición entre dos pendientes de sentido opuesto. En el arranque por la margen izquierda, a 42 m de iniciada dicha curva, la calzada desciende hacia el centro del claro y luego de bajar 2 m alcanza el punto de tangencia vertical, a 44 m del punto de apoyo para el tramo atirantado. Desde el punto de tangencia, la calzada comienza a ascender; al alcanzar 4 m por arriba de dicho punto continúa en pendiente de 5% en los 116 m que restan para llegar al arranque de la estructura por la margen izquierda.

El pavimento terminado presenta en el tramo en tangente una sección de V invertida, con pendiente de 2% del centro a las orillas. En el tramo en curva, este pavimento tiene una inclinación de 2%. El ancho de la calzada, de 18.40 m, aloja sendas calzadas de 8.25 m libres en cada dirección, separadas por un camellón central de 60 cm y parapetos de 65 cm en sus bordes.

Aeroestabilizador

Con el propósito de mejorar el desempeño de la estructura ante el empuje lateral del viento, particularmente en el tramo atirantado, se optó por instalar a lo largo de las caras verticales de las dovelas lo que se conoce como “aeroestabilizador”. Se trata de una recubrimiento que en el sentido transversal presenta una sección próxima al cuadrante de un círculo, donde éste tiene un diámetro de 3.38 m. Se fabricó con lámina corrugada cuyos canales corren longitudinalmente y quedó sujetado a las dovelas mediante tornapuntas metálicas fabricadas con perfiles L de 3” y 4”.

Secuencia de construcción

La construcción del puente comenzó por la excavación de la fosa donde se alojó la zapata de cimentación. Al tiempo que se comenzó a habilitar el acero de refuerzo, se tendió un terraplén a través del cauce, con tres conductos tubulares para que el agua continuara fluyendo. Terminada la zapata y una vez colado un tramo suficiente de la pila, se rellenó la excavación; el

proceso de colado de la pila se continuó por tramos de unos 3 m de altura hasta el punto donde arranca el cabezal, con el ensanchamiento para los pilones del atirantamiento.

La pluma de izaje fue instalada por la cara de la pila que mira hacia aguas abajo, aun antes de terminar el travesaño inferior, a fin de iniciar el montaje de la dovela de pila. Terminada ésta, se procedió a colar la losa de calzada y a montar las dos dovelas adyacentes. Paralelamente, se coló el primer travesaño y se tensaron los cables de presfuerzo al alcanzarse 80% de la resistencia a la compresión del concreto, como se especificó para todo el proyecto. Se continuó de inmediato con los pilones hasta el travesaño superior.

La siguiente fase del proyecto consistió en el izamiento de las dovelas utilizando las vigas de montaje. El ciclo de operaciones de una dovela a la siguiente fue el mismo: izar, montar y fijar las dovelas; colar la losa e instalar y tensar los tirantes respectivos, en cuanto el fraguado del concreto lograra la resistencia especificada. Paralelamente se continuaron los pilones, que alcanzaron su altura total cuando ya se tenían montadas tres dovelas de cada lado.

El frente de trabajo del tramo en doble voladizo, comenzando por la subestructura, se abrió mientras se avanzaba con las dovelas del tramo atirantado. Este frente de trabajo incluyó la fabricación del estribo en la margen derecha. La colocación de las dovelas para el doble voladizo se terminó antes de que concluyera la colocación de dovelas del tramo atirantado, lo mismo que la habilitación del estribo en la margen izquierda; esto con el fin de que las dovelas número 15 de este tramo se empotraran correctamente contra el tramo en doble voladizo y el estribo respectivo. Ya que se tuvo toda la estructura montada, se colocó el tirante definitivo adyacente al pilón por el costado aguas abajo, el cual sustituyó a un tirante instalado provisionalmente, de modo tal que permitiere el izamiento de materiales y su colocación sobre la calzada de rodamiento atravesando el plano formado por la trama de tirantes.

Antes de que se terminara la colocación de las dovelas atirantadas, fue concluida la construcción del tramo que va en doble voladizo y el estribo de la margen izquierda, para que una vez finalizado el tramo atirantado, se pudiera realizar la unión con el tramo hecho por el método constructivo de trabes.

Puente Barranca del Diablo
2013

EJE TRONCAL
México-Nogales

AUTOPISTA
Tepic-San Blas

UBICACIÓN
Tepic-San Blas
Km 510+930

ESTADO
Nayarit

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 257.6 m

No. DE APOYOS: 4

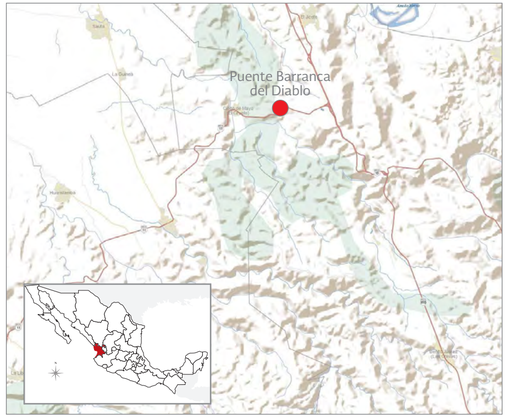
No. DE CLAROS: 3

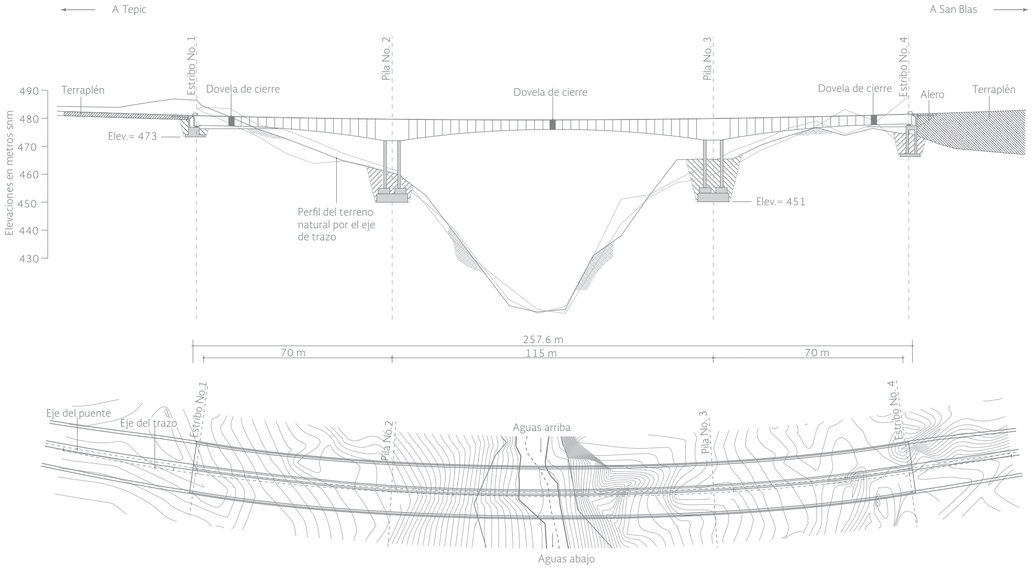
CLARO MÁXIMO: 115 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 19.03 m

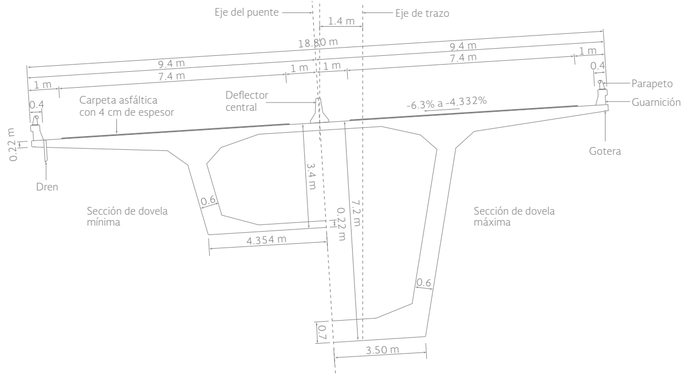
ANCHO TOTAL: 18.80 m

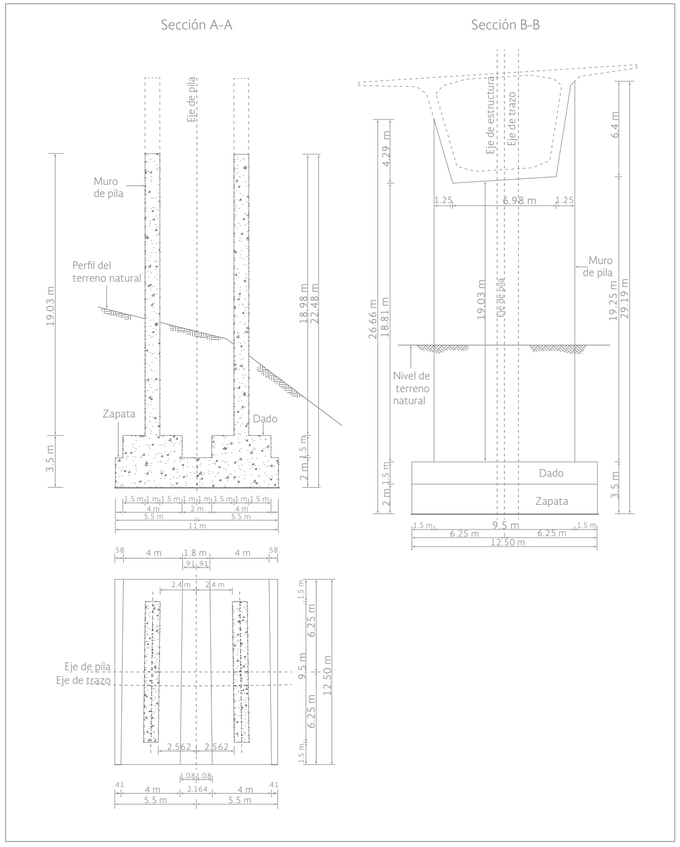
No. DE CARRILES: 4





Secciones transversales





Arriba: La cimentación está hecha con apoyo en zapatas aisladas, de 11.00x12.50 m de base y un peralte de 2 m. El dado es de 4.00x12.50 m con una altura de 1.50 m. **Abajo:** Los apoyos de este puente consisten en dos pilas rectangulares paralelas de sección maciza y constante de 9.50x1.00 m. Son de concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm². Las dos pilas que conforman cada apoyo están separadas por una distancia de 6 metros.

El puente Barranca del Diablo se ubica en el kilómetro 510+930 de la carretera Tepic-San Blas, en el estado de Nayarit.

El alineamiento horizontal del puente es ligeramente curvo, con una pendiente de entrada en el sentido longitudinal de 5.4% y una de salida de 6%; en el sentido transversal la pendiente varía de -6.3% (ejes 1 al 3) hasta -4.32% (ejes 3 al 4).

Este puente cruza una barranca que tiene una profundidad máxima de 68.3 m, medida ésta desde el nivel del tablero.

Subestructura

Los apoyos principales del puente son dos pilas de concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm². Éstas son de sección maciza y constante de 9.5 x 1.00 m,

formadas por dos pilas paralelas separadas a una distancia de 6 m. Estas pilas se encuentran desplantadas sobre zapatas de concreto reforzado de 11x12.5 m con un espesor de 2 m y un dado de 4.00 x 12.5 m con un peralte de 1.5 metros.

Los apoyos extremos del puente son estribos de concreto reforzado. Sobre cada uno de los estribos se encuentran dos apoyos tipo *Tetron* multidireccionales para recibir a las dovelas. En los topes laterales, se tienen dos neoprenos de 80 x 50 x 3 cm, de dureza *shore* 60. Sobre el tablero en los extremos del puente se encuentran puestas las juntas WP600. Por su parte los estribos y las zapatas de cimentación, fueron con concreto de resistencia de 250 kg/cm².

Superestructura

Para el diseño de la superestructura del puente se consideraron las cargas móviles tipo T3-S2-R4.

También construida con la técnica del doble voladizo, la superestructura está formada por tres claros continuos, el central de 115 m y dos claros laterales de 70 m para una longitud total de 257.2 m, más un ajuste en ambos extremos de poco más de 2 m, lo que dio una longitud total de 257.6 m. Los voladizos están constituidos por 16 dovelas hacia el lado de estribos y 16 más hacia el centro del puente, dando un total de 64 dovelas en los tres claros; además de dos dovelas sobre pila, dos dovelas de orilla, y tres dovelas de cierre; una en el claro central y una en cada estribo.

Las dovelas son huecas, tipo cajón, de concreto postensado, con longitud de 3 m. Se utilizó también presfuerzo transversal en la losa de calzada.

Todas las dovelas se colaron *in situ*; tienen una resistencia de 350 kg/cm². La sección transversal de las dovelas es variable; con un arranque de 7.2 m de peralte sobre la pila, hasta 3.4 m en las dovelas de cierre. Las dovelas sobre pila cuentan con diafragmas con una resistencia de 350 kg/cm², lo que permitió la conexión entre pila y dovela.

El tablero tiene un ancho total de 18.8 m, el cual abarca dos guarniciones con parapeto y un deflector central, además de dos anchos de calzada de 7.4 m para cuatro carriles de circulación. Sobre las dovelas se colocó una carpeta asfáltica con 4 cm de espesor.

Construcción de dovela de cierre para unirla con la de cimentación del estribo que descansa en los apoyos deslizantes tipo *Tetron*. Ambos estribos son de concreto reforzado, con una resistencia de 250 kg/cm². Después se realizó el colado de la losa.

Puente Horganal
2013

EJE TRONCAL
Oaxaca-Tehuantepec

AUTOPISTA
Oaxaca-Istmo de Tehuantepec

UBICACIÓN
Mitla-Entronque Tehuantepec II
Km 670+800

ESTADO
Oaxaca

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 220 m

No. DE APOYOS: 3

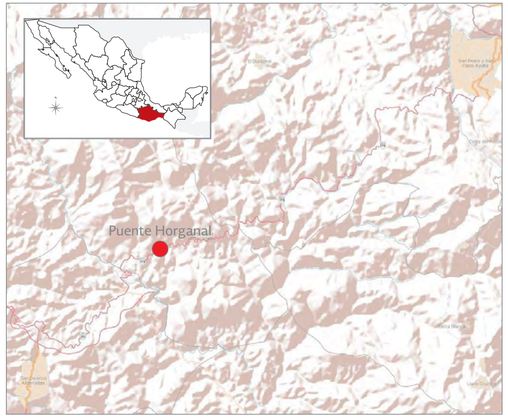
No. DE CLAROS: 2

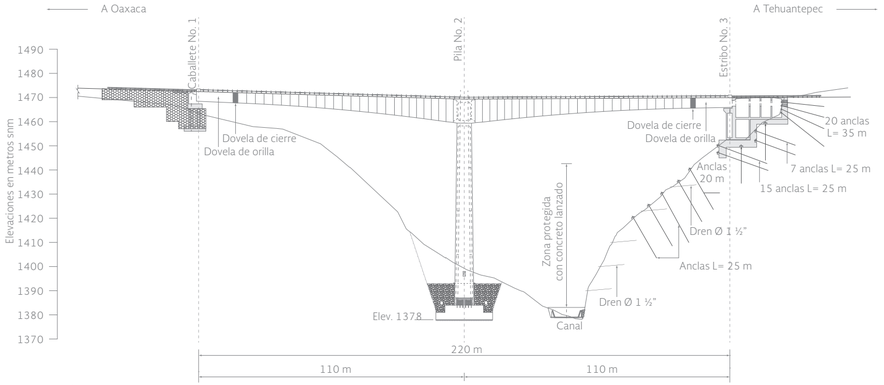
CLARO MÁXIMO: 110 m

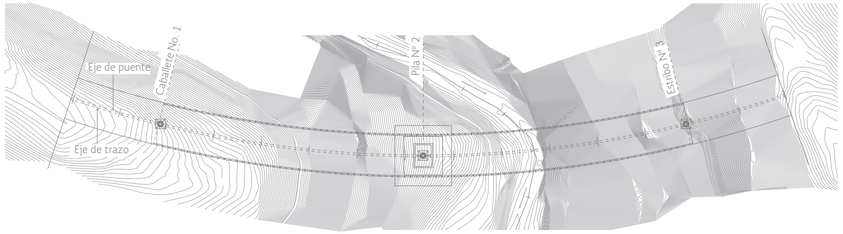
ALTURA MÁXIMA DE PILA: 91.33 m

ANCHO TOTAL: 18 m

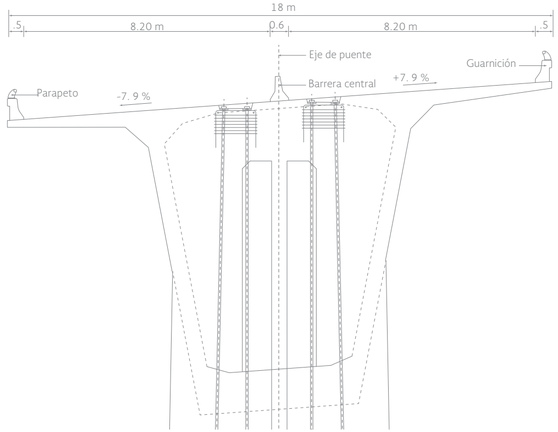
No. DE CARRILES: 4

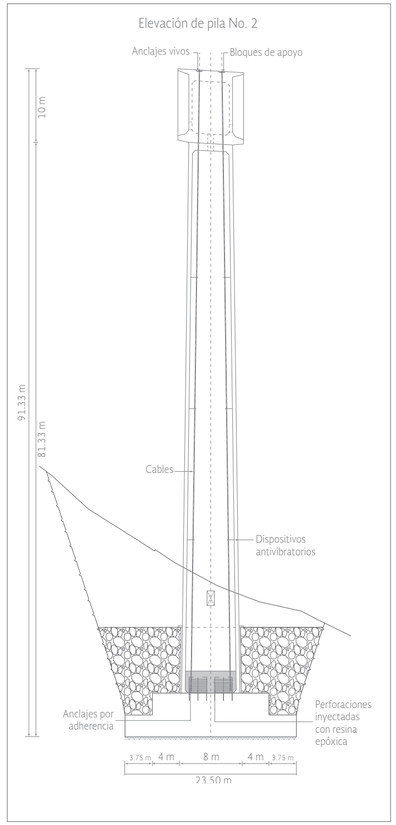






Dovela sobre pila





Izquierda: La pila de cimentación del puente está formada por una sección cajón hueca y tiene una altura de 75.33 m, desde la parte superior de la zapata hasta la parte inferior de la dovela sobre pila. Está apoyada sobre una zapata que cubre un área de 587.50 m² y tiene una altura de 6 m. La dovela sobre pila tiene una altura de 10 m con lo cual se alcanzan 91.33 m de altura máxima. **Derecha:** La superestructura del puente está constituida por 26 dovelas por ala que fueron construidas empleando el sistema de carros de doble voladizo como cimbra de los elementos. Estas dovelas están unidas entre sí por 44 cables de presfuerzo 19T15 que fueron tensados a 404 toneladas.

Antecedentes y objetivos

Ubicado al sureste del estado de Oaxaca, este puente forma parte del Corredor Carretero Puebla-Oaxaca-Ciudad Hidalgo, al estar dentro de la carretera Oaxaca-Istmo de Tehuantepec en el km 670+800. Libra dos claros de 110 m cada uno, teniendo una longitud total de 220 m y una altura de 91.33 m. Es un puente en curva, sin esviaje. Fue construido en doble voladizo con subestructura tipo cajón de peralte variable y presfuerzo interior.

La SCT comenzó los trabajos en el año de 2011 y con ellos se abrieron importantes nichos de oportunidad para el desarrollo turístico e industrial de la entidad, debido a que permite una mejor conectividad del puerto industrial de Salina Cruz con el centro del estado y con regiones aledañas, además de contribuir a la integración del sureste de México a través de modernas, rápidas y seguras vías de comunicación.

A pesar de no ser el más alto del país, dentro del estado de Oaxaca sí y es el primero de doble voladizo. Ha sido construido con alta tecnología, de manera que es capaz de resistir un sismo de hasta 9 grados Richter.

Estudios preliminares

La zona de estudio está dentro del llamado Complejo Xolapa, que representa una de las regiones con mayor grado de complejidad desde el punto de vista tectónico-estructural. Cabe señalar que la zona se localiza en la región que presenta mayor riesgo sísmico dentro de la República mexicana.

El puente cruza el cauce del arroyo El Horganal, el cual nace a 14.23 km al noreste y desemboca a 32 km hacia el sur del sitio de estudio. El nivel de aguas máximas, así como la velocidad máxima del agua bajo el puente no fueron determinantes para el diseño de la estructura del mismo, debido a que la rasante del camino se localiza muy por encima de lo requerido para que no tenga afectación alguna.

Se realizaron tres sondeos exploratorios sobre el eje de trazo con objeto de identificar los diferentes estratos del subsuelo y obtener los parámetros necesarios para el análisis de capacidad de carga axial y lateral, asentamientos, estabilidad de taludes y empujes.

Cimentación

La pila única está cimentada sobre una zapata cuadrada de 25.0 x 23.5 m de concreto reforzado, con un espesor de 6 m en la zona central y de 3 m en el extremo de la zapata, con una resistencia del concreto de $f'c = 250\ kg/cm^2$.

En los extremos del puente la superestructura se apoya sobre caballetes de concreto reforzado con una resistencia de $250\ kg/cm^2$. El eje No. 1 se encuentra sobre una zapata cuadrada de 9 x 16 m con la misma resistencia. Para el eje No. 3 se había diseñado una zapata y 12 pilas de concreto reforzado coladas *in situ*; sin embargo, debido a las condiciones desfavorables de desplante en la ladera, se modificó el proyecto para considerar una nueva cimentación conformada por un cajón de concreto lastrado y anclado al terreno.

Subestructura

El puente está sostenido por una pila al centro del claro de sección rectangular que cuenta con altura de 81.33 m desde su cimentación hasta la caja de anclaje de la dovela sobre pila y un ancho de 10 m; esta pila fue colada con concreto de resistencia de $300\ kg/cm^2$. La sección transversal de la columna es hueca y variable con la altura, se hace más angosta conforme aumenta su altura; parte de una sección en la base de la columna de 8 x 10 m y llega a una sección al final de la columna de 6 x 10 m, con un espesor en las cuatro paredes de 50 centímetros.

Sobre los cabezales se colocaron dos apoyos tipo *Tetron* multidireccionales con capacidad de carga vertical de 1 427.1 toneladas, rotación admisible de 0.01 rad y 208 mm de espesor. Sobre el tablero, en los extremos del puente se colocaron juntas de expansión tipo *Maurer*.

Superestructura

La dovela 0 de este puente tiene una longitud de 9 m; en ésta se encuentran adosadas de cada lado ocho dovelas con una longitud de 3.05 m cada una y 18 dovelas de 3.6 m cada una, además de tener una dovela de cierre y una de orilla para los dos extremos del puente. Estas dovelas fueron coladas *in situ* mediante cimbra móvil que va formando un doble voladizo de longitud creciente. Son de concreto postensado con una resistencia de $400\ kg/cm^2$, tipo cajón y de sección variable respecto de la altura, disminuyendo ésta conforme se llega a los extremos del puente, para quedar con un peralte de 10 m al extremo de pila y de 4 m en el extremo de cierre de dovela. Sobre las dovelas está colocada una carpeta asfáltica de 4 cm de espesor.

En general se utilizaron cables de presfuerzo longitudinales y transversales para un tablero de 220 m de longitud.

El ancho total del puente es de 18 m para alojar cuatro carriles para la circulación de vehículos. Tiene tres guarniciones con parapeto con lo que se logran dos anchos de calzada para el flujo en ambos sentidos; su ancho individual es de 7.5 metros.

Izquierda: En el interior y en los extremos del tren de dovelas (de la dovela 21 a la dovela de orilla) se colocaron seis cables 19T15 por lado en el lecho inferior, distribuidos tres de ellos en cada margen del puente, con una longitud promedio de 35.50 m y tensados a 404 toneladas que permitieron la transferencia de carga hacia los estribos. Estos cables fueron formados por 9 toneladas de acero de presfuerzo de 15 mm de diámetro. El puente cuenta con dos dovelas de orilla y dos dovelas de cierre que se realizaron con el propósito de cerrar su trayectoria y descargar en los estribos. Todo esto representa un total de 203 toneladas de acero de presfuerzo de 15 mm de diámetro. **Derecha:** En el fondo de la barranca, se encuentra un arroyo a 85 m por debajo del nivel de la rasante, el cual tuvo que ser desviado para desplantar la pila y evitar problemas con su cauce. En el estribo 1 (lado Oaxaca) el aproche se construyó con un muro de tierra armada que permitió lograr el nivel de la rasante sin necesidad de aumentar el terraplén con el ángulo de reposo del material empleado. En el estribo 3 (lado Tehuantepec) se empleó un sistema de anclas de cosido de estratos al terreno para estabilizar el material de la ladera y evitar desprendimientos que dañaran la estructura del puente. También se utilizó una protección con base en concreto lanzado para cubrir la superficie.

Puente Internacional Ferroviario Matamoros-Brownsville
2013

EJE FERROVIARIO
Monterrey-Matamoros

UBICACIÓN
Ferrocarril del Noroeste de Kansas City Southern de México
Libramiento Ferroviario Matamoros Km 4+586.40

ESTADO
Tamaulipas

TIPO DE PUENTE: Trabes

LONGITUD TOTAL: 827 m,
con 539 m dentro de territorio mexicano

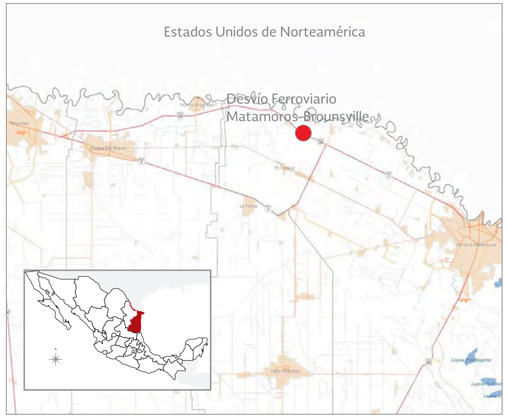
No. DE APOYOS: 40 dentro de territorio mexicano

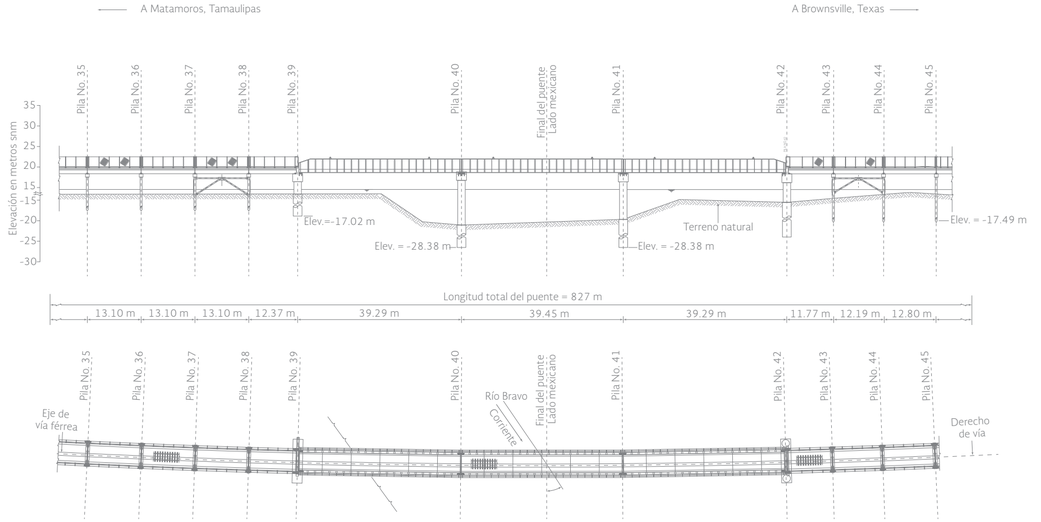
No. DE CLAROS: 39,
más 1 compartido con tramo estadounidense

CLARO MÁXIMO: 39.45 m

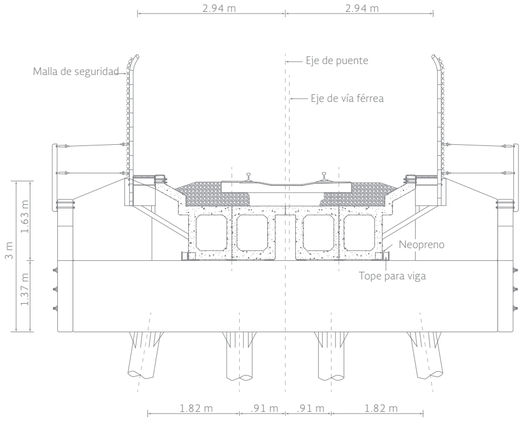
ANCHO TOTAL: 10.66 m

No. DE CARRILES: 1

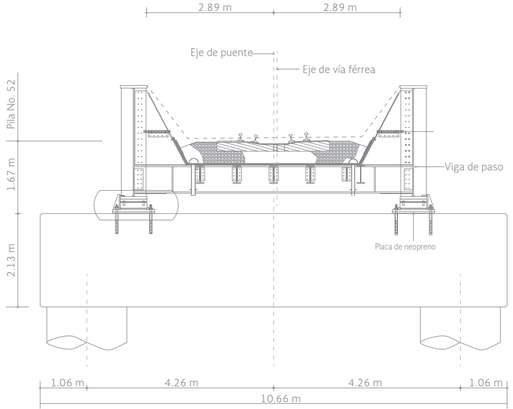


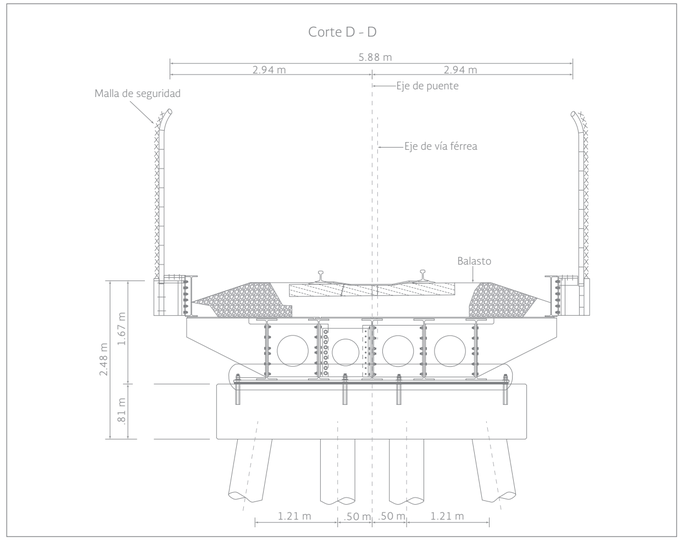


Corte A - A



Corte C - C





Antecedentes y objetivos

A finales del siglo XIX y principios del XX comenzaron a edificarse puentes ferroviarios para facilitar el flujo comercial a lo largo de la frontera entre México y Estados Unidos. Sin embargo, hacía ya un siglo que no se construía ninguna estructura de este tipo, y dadas las crecientes demandas de intercambio comercial a raíz de la firma del Tratado de Libre Comercio con América del Norte, el ferrocarril representa un detonador para este tipo de actividad entre las ciudades fronterizas de Matamoros, en Tamaulipas y la ciudad de Brownsville, en Texas. Debido a las distancias que estos transportes tienen que recorrer y al prolongado tiempo que les toma fue que este sistema podía volverse ineficiente, lo que se volvió en un tema de suma importancia ya que la mayoría de los productos exportados por la República mexicana salen del país por este medio, volviendo más competitivas a las empresas al reducir sus costos de traslado y exportar a un menor precio.

Por estas razones, la realización de un puente ferroviario representaría una puerta entre ambas ciudades fronterizas, además de dar cabida al diseño del desarrollo urbano dentro de éstas. Tras 11 años de trabajos de licitación, logró llevarse a cabo el proyecto del tendido de una vía ferroviaria que conectara ambos puntos por medio de un puente internacional.

Finalmente, el puente internacional ferroviario Matamoros-Brownsville se ubicó a 10 km al noreste de la ciudad de Matamoros, entre el Río Bravo y la vía ferroviaria Matamoros-Reynosa, con una longitud total de 827 m, de los cuales 539 m se encuentran dentro de territorio mexicano y el resto, con las mismas características, dentro del estadounidense.

Este puente se localiza en el km 4+586.40 del Libramiento Ferroviario Matamoros-Brownsville, que a su vez, se ubica en el km 314+046 de la vía férrea Monterrey-Matamoros, abarcando un área destinada anteriormente a terrenos de cultivo, en su mayoría de propiedad privada, con una longitud aproximada de 11 km, cruzando en su trayecto algunos canales y arroyos perpendiculares al trazo, lo que obligó a la construcción de algunos puentes para salvar estos puntos sin causar afectaciones ni alterar su curso, pues son de alta utilidad para el riego de las áreas agrícolas.

Estudios preliminares

Para la realización del proyecto del Libramiento Ferroviario Matamoros-Brownsville se realizaron los estudios pertinentes de mecánica de suelos, en los que se encontraron condiciones desfavorables en los caminos de acceso para el paso de tránsito pesado, por lo que se realizaron trabajos de revestimiento con material de banco, con 15 cm de espesor en una longitud de 3.7 km partiendo desde el entronque con la carretera Matamoros-Reynosa. Adicionalmente, se realizaron estudios de penetración estándar para verificar la resistencia del terreno entre los apoyos 39 y 40 por considerarse el área más desfavorable debido a su cercanía con el río Bravo.

Las principales instalaciones consistieron en la construcción de una mesa de tensado para trabes, armado de acero de refuerzo para fabricación de pilotes y cabezales, además de bodegas para almacenamiento de materiales por lo que se adecuaron dos predios en los ejidos El Sabino y Guadalupe.

Cimentación

La cimentación la componen 168 pilotes de concreto reforzado con camisa de acero estructural A-252 grado 3 de 20 pulgadas de diámetro cada uno. Se encuentran colocados en grupos de cuatro, aproximadamente a cada 13 m de distancia, con una resistencia de hasta 70 t/pilote y a 17.50 m de profundidad, desde el eje 1 hasta el 38, ya que en los ejes 39 al 41 se tuvo que realizar una cimentación con base en pilas de concreto reforzado de 2.13 m de diámetro por encontrarse sumergidas en la corriente del río Bravo; se hizo

mediante la formación de una plataforma de manera alternada en cada apoyo para no afectar el cauce del río. Una vez fabricada se ejecutaba la perforación y el colado de dichas pilas. Sin embargo, se encontraron inconsistencias en el material de los estratos más profundos de la zona del río, lo que provocó implementar la colocación de un ademe metálico permanente con 30 m de profundidad de las dos pilas de apoyo en el eje 40.

Para la cimentación del caballete en el eje 1 también se utilizaron cuatro pilotes con las mismas características que los de las pilas en el resto de los ejes.

Subestructura

Una vez fabricados los pilotes en los apoyos 39 y 40 se colaron dos columnas de concreto reforzado –por eje– de 1.83 m de diámetro y 6 m de altura promedio. En el resto de la subestructura se prolongaron los pilotes de cimentación hasta una altura de 4.50 metros.

Cada uno de estos elementos se continuó con la fabricación de cabezales de concreto reforzado colados *in situ*. En promedio cada apoyo consta de cuatro pilotes, con excepción en los ejes 4, 12, 21 y 30 donde se colocaron dos filas de cuatro debido a la instalación de arriostramientos.

En el eje 1 se realizó un cabezal con concreto prefabricado, montado posterior a la tarea de descabezar los pilotes, y se soldó a los mismos por medio de una placa metálica de unión.

Para la realización de todas estas tareas se utlizó concreto hidráulico f'c = 300 kg/cm, así como el empleo de un aditivo fluidificante de alto rango para evitar el agrietamiento por la pérdida de humedad.

Superestructura

Desde el eje 1 hasta el 38 la superestructura está conformada por 76 trabes tipo cajón doble de concreto f'c= 450 kg/cm², con un peralte de 1.06 m y una longitud promedio de 13 m, colocadas en pares a lo largo de los apoyos en cada eje, asentadas sobre los cabezales por medio de placas de neopreno. Sobre la superficie de las trabes se colocó la cama de balasto correspondiente, los durmientes de concreto y los rieles metálicos que conforman la vía de ferrocarril.

Respecto de los apoyos 39, 40 y 41, se tiene una estructura metálica formada por vigas maestras de acero estructural tipo A-709 grado 50, con una longitud de 39.45 m cada una. La unión entre éstas se realizó por medio de vigas secundarias transversales y arriostramientos atornillados a la estructura principal. Sobre la superficie se colocó una placa metálica para contener el balasto.

Hacia ambos lados del puente se construyeron andadores a base de rejilla tipo *Irving*, flanqueada por malla ciclónica galvanizada.

Cabe decir que la altura del puente en su punto más elevado es de 15 m, medidos desde el nivel de terreno natural.

Enfrente: Debido a las exigencias de intercambio comercial, debía atenderse el problema de tránsito vehicular y ferroviario dentro de dichas ciudades, lo que derivó en la idea de reubicar los patios y la vía férrea fuera de la ciudad de Matamoros. El desvío fue la solución al bloqueo de nueve cruceros dentro de la zona urbana. Así, se evitó el cruce por escuelas, centros comerciales, unidades habitacionales y vialidades, a la vez que se agilizaron las relaciones de intercambio. Este proyecto sustituye al B&M Bridge Co., por donde cruzaban hasta 200 000 vagones mensualmente entre Brownsville y Matamoros; actualmente el ferrocarril puede circular a cualquier hora, durante los 365 días del año al estar exento del paso por la ciudad tamaulipeca, incluso, transitar a una velocidad de 60 km/hr tres veces mayor que la velocidad a la que se transitaba anteriormente. **Arriba:** Los patios ferroviarios están ubicados en un área de 35.70 ha, y a una distancia de 8 km del Río Bravo. Constan de 4 vías de recibo y despacho y 11 vías de clasificación; mientras que los edificios de servicios ocupan un área de 4 ha, y constan de oficinas administrativas, aduana y talleres.

Puente Gilberto Borja Navarrete
2014

EJE TRONCAL
Acapulco-Tuxpan

AUTOPISTA
México-Tuxpan

UBICACIÓN
Nuevo Necaxa-Ávila Camacho
Km 163+620

ESTADO
Puebla

TIPO DE PUENTE: Doble voladizo

LONGITUD TOTAL: 850 m

No. DE APOYOS: 8

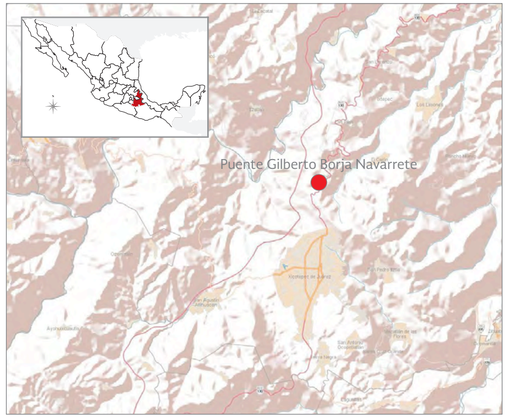
No. DE CLAROS: 7

CLARO MÁXIMO: 180 m

ALTURA MÁXIMA DE PILA: 225 m

ANCHO TOTAL: 18.70 m

No. DE CARRILES: 4



Antecedentes y objetivo

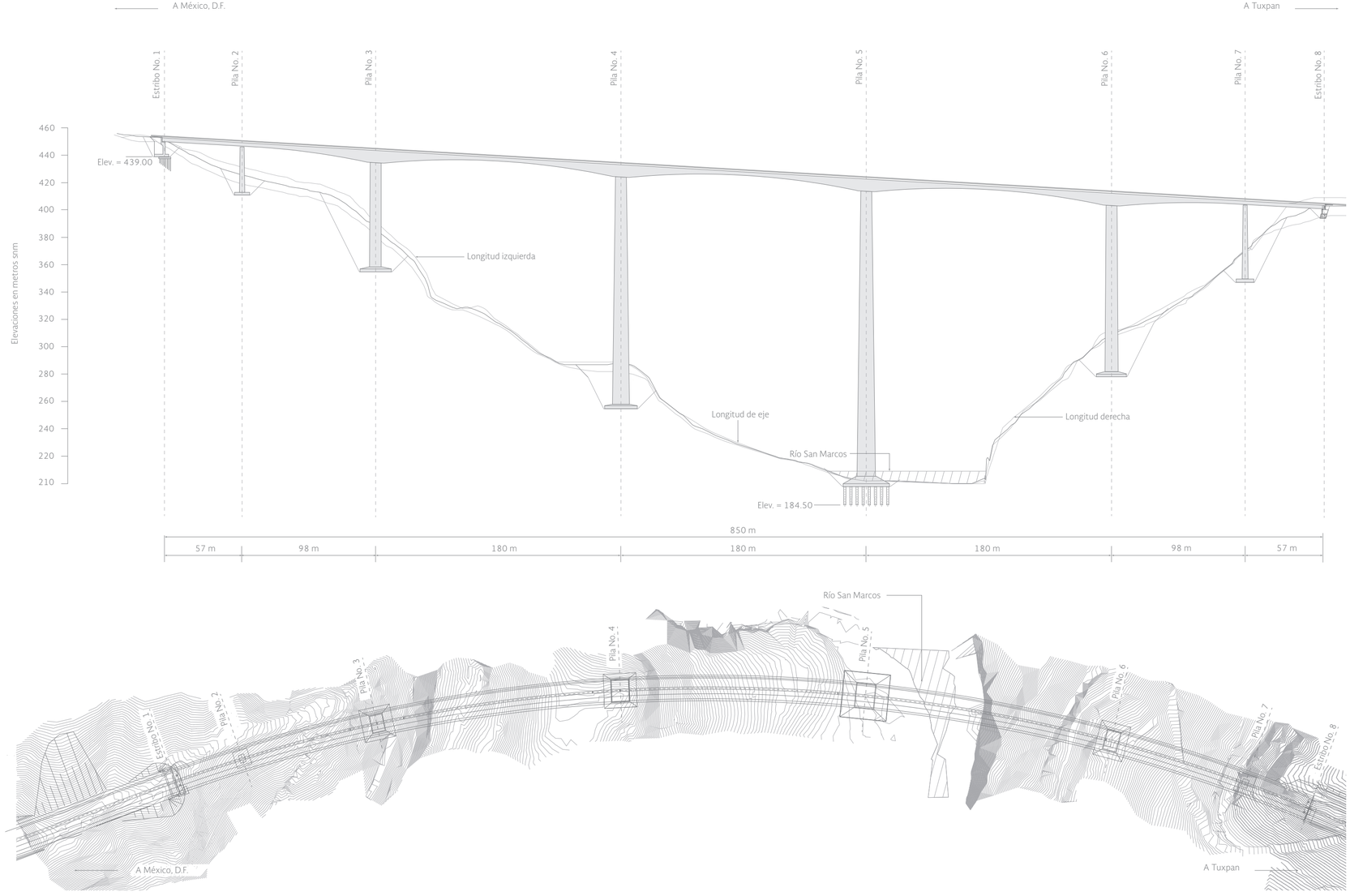
La autopista México-Tuxpan forma parte del corredor carretero Acapulco-Tuxpan, que comunica a la capital del país con dichos puertos, los más próximos a ésta sobre las costas del océano Pacífico y del golfo de México, respectivamente. La construcción de este corredor carretero se ha realizado por etapas. Para terminarlo, se trabajó en dos tramos, con los que se resolvió el descenso de unos dos mil metros de desnivel, desde el borde del Altiplano, en las inmediaciones de Huauchinango, Puebla hasta la llanura costera del golfo, tramos a los que convencionalmente se conoce como TC1 y TC2.

El Tramo Carretero 1 (TC1), que va de las afueras de Huauchinango hacia Nuevo Necaxa, hasta un paraje a cuatro kilómetros al norte de La Ceiba, presenta una longitud de 37 km. Desciende desde 1 450 msnm hasta 680 msnm. Puesto que se trata de construir una vía carretera de altas especificaciones, con cuatro carriles, dos en cada dirección, se requieren túneles, 12 puentes y viaductos, que en total suman 3 165 m. En este conjunto, destaca por sus características el puente Gilberto Borja Navarrete, por el cual se cruza el río del mismo nombre de la margen derecha a la izquierda, cuando se viaja en dirección a la costa del golfo.

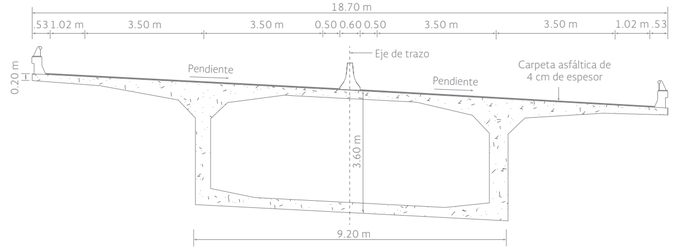
Modificación del proyecto

Durante la etapa de licitación se tenía desarrollado un proyecto que consideraba un puente en tangente, con una longitud total de 734 m, nueve apoyos, un gálibo de 216 m en el punto de mayor altura y una pendiente de aproximadamente 4%. La estructura se compondría de tres segmentos: dos a los extremos, de 160 y 52 m de longitud, respectivamente y el central, de 520 m. Los segmentos de los extremos abarcarían seis claros: uno desde el estribo hasta el apoyo 4; el otro, desde el apoyo 8 hasta el estribo opuesto. El segmento central, con cuatro claros dispuestos simétricamente entre los apoyos 4 y 8, consistiría en una estructura en doble voladizo acostillado, con un peralte constante de 3.39 m para la trabe bajo la calzada de rodamiento y una costilla central de peralte variable, de 1.20 a 11.80 metros. Finalmente, se optó por realizar importantes cambios sobre el proyecto inicial.

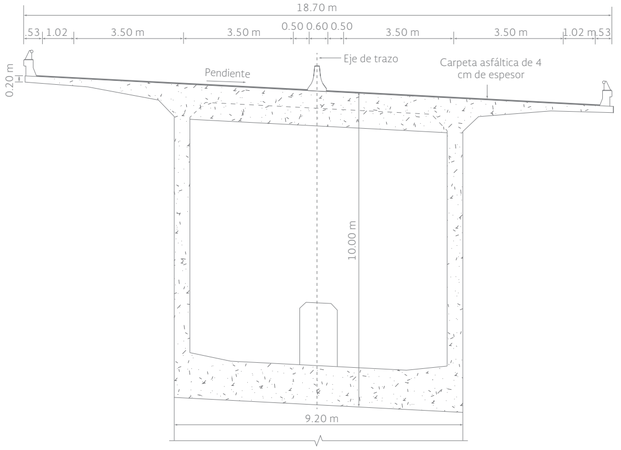
El puente Gilberto Borja Navarrete se ha convertido en un ícono de la ingeniería de puentes en doble voladizo de grandes dimensiones, 850 m de largo y 225 m de altura, que lo coloca como la estructura más alta en nuestro país e incluso en América. Pertenece a uno de los proyectos carreteros más complejos y ambiciosos, puesto que se reduce el tiempo de recorrido entre el centro del país y el golfo de México en 1.5 horas, en una zona de impresionantes cañadas. Con esto se convertirá Tuxpan en el puerto más cercano a la capital de la República mexicana, detonando así el desarrollo económico de esta importante región.

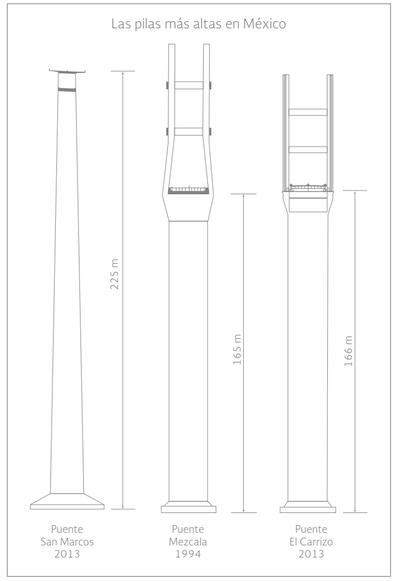


Sección transversal (centro vano)



Sección transversal (sobre las pilas 3 a 6)





A consecuencia de las modificaciones en el trazo se elevó el nivel de la autopista, lo que redundó en una prolongación de la estructura en 15%, hasta 850 m, y en la alteración de su trayectoria, de tangente a curva. al reducirlos a seis, y se estableció otro procedimiento para construir la superestructura, a saber; la trabe de cajón de sección variable, que varía desde su peralte máximo de 10 m sobre los apoyos hasta 3.60 m en la dovela de cierre. El ancho de la calzada disminuyó 30 cm, a 18.70 m, como resultado de haber suprimido el acostillamiento.

Un aspecto particularmente significativo de estos cambios es la dimensión que cobró la pila de mayor tamaño. Inicialmente tendría 216 m de altura; en el proyecto ejecutado creció hasta 225 m.

Comparada con la más alta construida hasta ese entonces en México, (una del puente Mezcala) resultó 32% mayor. Comparada con las de otros puentes del mundo resultaría la segunda más alta, superada solamente por la del viaducto Millau de 343 m, en los Pirineos franceses. (En el segundo de los casos, se considera la altura desde el cimiento hasta la calzada de rodamiento, se excluye la del poste para los tirantes).

Apoyos y superestructura

El puente construido consta de ocho apoyos: dos estribos y seis pilas, simétricamente espaciados entre sí. Los tramos en los extremos, entre los estribos y las pilas 2 y 7, respectivamente, presentan un claro de 57 m. Siguen dos tramos (entre las pilas 2 y 3, y 6 y 7) con un claro de 98 m. Al centro de la estructura están las pilas 3 a 6, separadas 180 m entre ejes y con alturas de 90 m, 185 m, 245 m y 150 m, respectivamente.

Todas las pilas presentan fuste piramidal de sección rectangular. Los dos tramos en los extremos son estructuras tipo viaducto; los tres intermedios lo son en doble voladizo. Transversalmente, la dovela presenta sección de cajón, con una distancia de 9.20 m entre las caras externas del cajón y sendos voladizos de 5.05 m cada uno.

Calzada de rodamiento

Como se mencionó anteriormente, la trayectoria del puente es en curva circular, con un radio de 1150 m. La calzada presenta una pendiente longitudinal constante de 5.8% en sentido longitudinal; la diferencia de alturas entre los extremos es de 95 m. Cuenta con dos carriles en cada dirección, acotamientos externos de 102 cm e internos de 50 cm, una división central de 60 cm y guarniciones laterales de 53 cm; el ancho total de la estructura es de 18.70 metros.

Estudios preliminares

Se realizaron los estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos propios del caso, así como el sísmico, dado que el puente se ubica en la zona B de la regionalización sísmica de México, donde se considera que el grado de riesgo por terremoto es medio y la aceleración no supera 70% de la gravitacional.

Se efectuó también un estudio hidrológico, pues el proyecto ubicó la pila principal sobre un leve meandro del cauce fluvial, en un punto que durante la temporada de lluvias crece hasta 6 m por encima del nivel ordinario y presenta un gasto de hasta 5 000 m³/s; de ahí el propósito de estudiar las posibilidades de que una avenida causara daños a la pila.

Por otra parte, fue muy importante estudiar los efectos del viento, pues la estructura cruzaría una cañada de gran longitud y quedaría expuesta a la condición más desfavorable: el empuje lateral. Mediante un modelo a escala y las correspondientes pruebas en túnel de viento se llegó a la conclusión de que el factor determinante para efectos de cálculo estructural sería justamente contrarrestar dicho empuje. Para realizar el diseño, se consideró una velocidad de viento regional de 160 km/h.

Obras previas y preparativos

Luego de valorar varias rutas de acceso al sitio de construcción, se optó por la conocida como Las Pilas, que comunica el frente Huauchinango de la obra, con la carretera federal No. 130. De cualquier forma, fue necesario ampliar 4 km de su trayectoria, prolongarlo 3.8 km y revestirlo, en un tramo de 2 km, con concreto hidráulico, en previsión de los efectos que las persistentes lluvias de la zona ocasionan.

Para cruzar el río San Marcos se instalaron dos puentes provisionales: uno colgante para peatones y otro vehicular. Este último, con una capacidad de carga de 60 toneladas y una amplitud de 3.60 m en su calzada, consistía en dos trabes invertidas, formadas mediante seis celosías de acero paralelas, en dos grupos de tres a cada costado, ensambladas *in situ*, empleando módulos prefabricados. Este puente requirió construir un estribo de material apisonado en una de las márgenes, el cual creció hasta una altura de cinco metros al borde de la corriente, más el colado de dos marcos de concreto armado en cada extremo, desde donde se tendieron cuatro tirantes que aumentan a la capacidad de carga. El propósito final de ambas estructuras fue garantizar que el paso de personas y equipos no se interrumpiera nunca entre las márgenes derecha e izquierda del cauce, ni siquiera durante la época de crecidas de la corriente.

Por otra parte, se instalaron dos plantas de concreto, cada una con capacidad de producción de 50 m³/h. Por lo accidentado de la topografía, se tuvieron que instalar a 2 km del sitio, adyacentes al camino mencionado.

Para construir la pila No. 5, cuyo desplante quedaría todo el tiempo bajo el nivel del agua, se realizó una obra de desvío, construyendo un bordo perimetral de 30 m de ancho, 7 m de altura y 180 m de longitud que acentuó la curvatura del meandro. Para el efecto se emplearon 40 000 m³ de material dragado del lecho de la corriente.

Se dispuso finalmente de una planta para habilitar y roscar el acero, cuya capacidad de almacenamiento era de dos mil toneladas. Decididos los frentes de obra y el calendario de trabajo, se adquirieron los equipos necesarios para satisfacer la demanda, entre los que destaca un aparato que permitió habilitar hasta 700 estribos por hora, empleando varillas de tres a cinco octavos de pulgada de diámetro. Otros aparatos permitieron forjar y tirar roscas en las varillas a fin de establecer la continuidad de las varillas longitudinales con conectores roscados en lugar de los empalmes acostumbrados. Atendiendo a las especificaciones del proyectista, este procedimiento novedoso se sometió a pruebas para su aceptación, tanto del proyectista de la estructura como de la dirección general respectiva de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; los resultados superaron en en alto porcentaje los requerimientos normativos.

El cruce del río San Marcos fue uno de los principales obstáculos a vencer en el proceso de construcción del puente, por lo que fue necesario instalar dos puentes provisionales, uno de ellos colgante para los peatones y el otro, vehicular, el cual tuvo una capacidad de carga de 60 toneladas.

Izquierda: La subestructura comenzó a construirse por la pila No. 5, la cual está ubicada dentro del agua. La zapata de desplante consiste en una base de 34 m por lado y 2 m de altura; después comienza el talud de la zapata que crece 5.50 m y remata en un cuadrado de 14.50 m por lado. El clima fue un factor con el que se tuvo que luchar durante toda la construcción; en la zona la lluvia está presente prácticamente todo el año y se sabe que la precipitación media anual es de más de 1000 mm. **Derecha:** Con el fin de controlar el curado de la mezcla se buscó mantener la temperatura de colación en 23°C y aminorar la pérdida de calor por choque térmico entre el calor de la mezcla y la temperatura ambiental, para lo cual se cubrieron las caras de la zapata con una pared adiabática hecha de tableros de espuma de poliuretano. La pared se aplicó en hiladas, dos de 1 m de altura y cuatro de 1.25 m, conforme se iba vertiendo la mezcla; después se agregó una lona.

Secuencia de construcción

La construcción de la subestructura comenzó por la realización de la cimentación de la pila No. 5, que debía terminarse antes del comienzo de la temporada de lluvias en el año de 2009; lograrlo fue un factor crítico para iniciar la realización de la superestructura y por consecuencia, entregar el proyecto según lo previsto. Se comenzó con las cimentaciones de las pilas 4, 3 y 6, se tomaron en cuenta principalmente para decidir esta secuencia los volúmenes de excavación y el tratamiento que se aplicó a los taludes, más la posibilidad de reutilizar el sistema de cimbrado en la fabricación de las dos últimas pilas. Por último, se construyeron las pilas 2 y 7, junto a los estribos respectivos.

En cuanto a la fabricación de la superestructura, se planeó comenzar el voladizo sobre la pila No. 3 y, casi enseguida, con el de la pila No. 6, coordinando los otros frentes de trabajo de modo que una vez terminados, fuera factible rigidizar de inmediato los voladizos P2-P3 y P6-P7 y conectarlos a los tramos de viaducto que les correspondiesen, apoyados en las pilas 2 y 7. Los voladizos sobre las pilas 4 y 5 se realizaron al final. Esta secuencia permitió limitar a tres el número de carros de colado.

Sin embargo, factores imprevistos demoraron la terminación de las pilas 4 y 5; particularmente factores disruptivos, como lo fue un deslizamiento en los tajos para la pila No. 4. Ajustados los calendarios de obra, también se requirió un rediseño del voladizo de la misma pila, pues por uno de los extremos debió permanecer siete meses en dicha condición de voladizo (o *cantilever*), a la espera de que se pudiera conectar y rigidizar con el de la pila No. 5.

Cimentación de la pila No. 5

Merece una consideración separada, por la singularidad de su tamaño y las condiciones geológicas y de ubicación dentro de la corriente. El proyecto ejecutivo preveía hincar 64 pilotes dispuestos en cuadrado, cada uno con diámetro de 1.50 m y empotramientos mínimos de 5.50 m en roca y 2.50 m en roca sana. Estos pilotes sustentarían una zapata cuadrada de 34 m por lado.

Ya desde la perforación del primer pilote se apreciaron diferencias en el perfil geológico entre lo previsto y lo encontrado, que exigieron aumentar la profundidad de hincado hasta 16 m. El imperativo de terminar antes de las crecidas de la temporada de lluvia hizo necesario agregar otra perforadora; las profundidades alcanzadas oscilaron a la postre entre 9.00 y 25.50 m. Dentro de la masa de cada pilote se ahogaron cuatro tubos de acero, de 4" y 2" de diámetro, dispuestos según ejes ortogonales en relación con la sección circular, a fin de realizar por dicho medio, estudios de ultrasonido que permitieren corroborar la integridad del elemento estructural en cuestión, una vez terminado.

Dichos estudios revelaron anomalías de diversa índole en 46% de los pilotes. Para remediarlas inicialmente se decidió inyectar lechada por los tubos de mayor diámetro y realizar perforaciones de 3" de diámetro para extraer núcleos de muestra a las profundidades a las que se habían detectado las anomalías; por lo general, en las puntas. La causa que se propuso, dado lo ocurrido, fueron las filtraciones subterráneas tanto del río como de la ladera montañosa. Se intentó reparar esas oquedades mediante el lavado con agua y aire a presión para después inyectar una lechada de agua y cemento con una resistencia de 400 kg/cm^2. Al descubrirse que con las inyecciones no se lograba la reparación, se probaron mezclas con aditivos para dar más densidad a la lechada e impedir que fuera arrastrada por las corrientes subterráneas.

Los esfuerzos de reparación continuaron hasta principios de 2010; sin embargo, pruebas posteriores demostraron que los resultados distaban de ser satisfactorios. Se decidió entonces hincar 14 pilotes adicionales, con diámetro de 1.20 m y ademe perdido tipo *Bauer* hasta la profundidad de la punta; esto último con el propósito de aislar al elemento de las filtraciones. Los pilotes adicionales se colocaron al tresbolillo, sobre ejes entre los de los pilotes originales; cuatro se ubicaron adyacentes a la esquina de la zapata río arriba (noroeste) y los 10 restantes, en la esquina corriente abajo (noreste). En junio de 2010, una nueva serie de pruebas demostró que en estos pilotes no existían deficiencias.

La zapata de desplante de la pila consiste en la suma de dos prismas: un paralelepípedo con 34 m por lado, como se dijo, y 2 m de altura; y sobre éste, una pirámide truncada de 5.50 m de alto, rematada en un cuadrado de 14.50 m por lado. En total, fueron 6 000 m^3 de concreto que se colocaron en una sola operación. En consideración de las dificultades para lograrlo, se planeó colar un concreto resistente a cloruros, empleando cemento puzolánico con bajo calor de hidratación, se agregó hielo triturado y aplicó un retardante de fraguado de 14 horas. La intención fue mantener la temperatura de colocación en 23°C y aminorar la pérdida de calor por choque térmico entre el calor de la mezcla y la temperatura ambiental, cubriendo las caras de la zapata con una pared adiabática hecha de tableros de espuma de poliuretano. La pared se aplicó a las caras de la zapata en hiladas, dos de 1 m de altura y cuatro de 1.25 m, conforme se fue vertiendo la mezcla, y después se agregó una lona, todo esto a fin de controlar el curado de la mezcla.

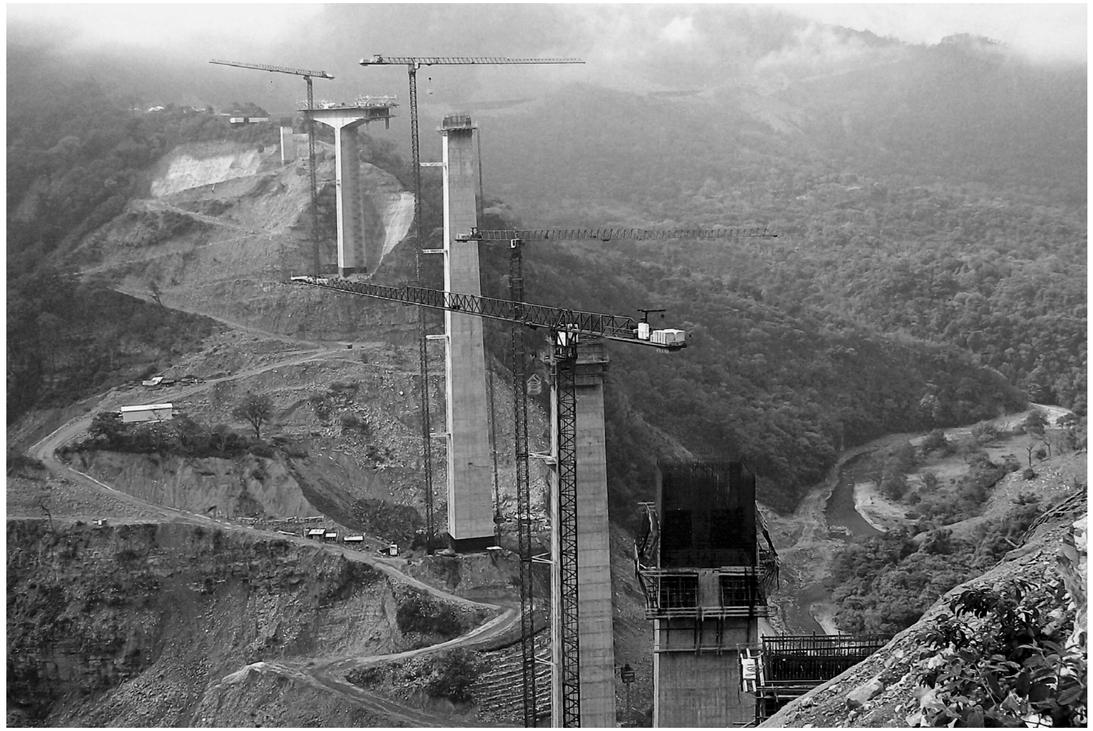
En junio de 2010 se comenzó con la habilitación de las 800 toneladas de varilla que conforman el armado de la zapata. Como se preveía un año lluvioso, se dragó en el lecho del río un tramo de 200 m. A fin de bajar el nivel de las aguas, se levantó un muro de contención de 3.50 m de alto por los tres costados de la zapata expuestos al meandro del cauce, previendo cuatro drenes por el costado aguas abajo; se prepararon bombas para achicar filtraciones que se presentaron mientras se habilitaba el acero. Para monitorear la temperatura de la masa, se instalaron a diferentes alturas del armado seis termopares: tres en el corazón y tres más, próximos a una de las caras. El colado inició el 23 de julio del año de 2010, se contó con las dos plantas mencionadas, cuatro máquinas para triturar hielo, cuatro bombas con plumas de 42 m, dos plantas de energía eléctrica de 350 kW, 30 ollas revolvedoras y 42 vibradores eléctricos de 3". El procedimiento terminó en la madrugada del día 28, al cabo de cuatro jornadas de trabajo continuo. Resultado de la prolongación apareció una filtración que se presentó el día de inicio; cuyo sellado se logró a costa de grandes esfuerzos.

Excavaciones y tratamiento de taludes

La mala calidad de la roca del macizo montañoso donde se emplazaron las pilas restantes del puente hizo necesario aplicar el tratamiento a los taludes, a fin de mantenerlos lo más inclinado posible y sin deslizamientos. Donde la roca estaba alterada o fracturada, se colocó malla electrosoldada 6-6/4-4 y concreto lanzado, de resistencia f'c = 250 kg/cm^2. Las rocas de buena calidad se trataron con el mismo concreto, adicionado con fibra de acero en vez de la malla, que permite importantes ahorros de tiempo.

Independientemente de lo anterior, cuando todavía faltaban 13 m para que la excavación del cimiento de la pila No. 4 alcanzare la profundidad especificada, se detectó, por la aparición de grietas de tensión, un desli-

El puente Gilberto Borja Navarrte tuvo enormes retos por las difíciles condiciones topográficas y geológicas de la zona. Para hacerlo, fueron valoradas diversas alternativas para acceder al sitio de cimentación de los apoyos, la más adecuada fue el acceso desde el lugar llamado Las Pilas; sin embargo, resultaba ser un camino estrecho por lo que debió ampliarse a lo largo de 4.5 km y construir 3.8 km de camino nuevo, removiendo un total de 250 000 m^3 de tierra. A consecuencia de las pronunciadas pendientes que presentaba el acceso y las constantes lluvias, se realizó el revestimiento de los taludes con concreto hidráulico para evitar posibles deslaves.



Los avances en la construcción de la subestructura debieron ser precisos, seguros y rápidos de realizar, por lo cual, para las pilas del puente Gilberto Borja Navarrte, se implantaron sistemas innovadores de cimbras, así como el uso de maquinaria especializada, equipos de bombeo de concreto y procedimientos constructivos ya conocidos en la construcción de puentes en México, pero con un mayor grado de tecnología para cumplir con un nuevo reto.

zamiento de piso. Luego del estudio geológico del caso, se determinó la necesidad de retirar 107 000 m³ de terreno en la porción más elevada del talud, lo que alivió el empuje que dicho volumen ejercía sobre las capas inferiores de terreno y por consecuencia, el deslizamiento. Sondeos posteriores revelaron que la cimentación de la pila se podría realizar según proyecto, sin refuerzo adicional o tratamiento del subsuelo, por lo que solamente se optó por instalar drenes bajo la zapata.

Construcción de pilas

Como se mencionó anteriormente, la planta para habilitar acero de refuerzo contaba con los aparatos que permitían acondicionar varillas a fin de establecer su continuidad mediante conectores roscados, con dos consecuencias importantes: ahorro de material y facilidad de montaje del armado. Dichos aparatos permitieron tirar la rosca al extremo de una varilla y forjarla en frío para mantener su capacidad resistente, no obstante la disminución de sección. Las parrillas de armado se preparaban en módulos a pie de pila y se izaban con una grúa torre. Ante la eventualidad de que alguna barra no tocara la barba de una barra instalada anteriormente y ya embebida en un colado, se soltaba la barra en cuestión hasta que descendiera al punto de contacto requerido.

Para colar la pila No. 5 se empleó un recurso novedoso: la cimbra autotrepante. Se trata de un dispositivo que se desliza verticalmente sobre seis rieles fijados a la cara de la pila hasta donde está construida, empleando dispositivos incorporados a la cara durante su construcción. Dicho mecanismo proporciona una plataforma de trabajo e incorpora los gatos hidráulicos necesarios, tanto para izar todo el conjunto como para controlar la separación y la inclinación de los pares de cimbra con los que es colada la cara de la pila. Estos mismos aparatos permiten instalar redes perimetrales para detener la caída de operarios o herramientas, un aspecto de capital importancia para prevenir accidentes fatales. El proceso de construcción de la pila comenzó por hacer un primer tramo con altura suficiente como para instalar cuatro cimbras autotrepantes, una en cada cara. Hecho esto, se coló un segundo tramo, de 4.50 m de altura, empleando ya las cimbras del aparato mismo; en este segundo tramo y en todos los subsecuentes se hicieron también los preparativos que permitieron colocar los mecanismos de autosoporte para los rieles de deslizamiento vertical. Una vez fraguado el concreto del tramo de muro, se separaron las cimbras por el interior y el exterior de la cara y el

Por la cantidad de acero de refuerzo utilizada en el proyecto, se edificó una planta de habilitado y roscado de acero equipada con tecnología de punta con el fin de cumplir con los exigentes programas de suministro. Además, se consideró su colocación mediante paneles prearmados en piso utilizando uniones roscadas, con el fin de modular o segmentar los muros de armado en secciones de alta maleabilidad y llevarlos en la grúa torre hasta su ubicación en las pilas. Este procedimiento permitió aumentar el rendimiento y brindar mayor seguridad a los trabajadores al disminuir el tiempo de exposición a los trabajos en altura.

aparato se izó sobre sus mismos rieles. Terminada una operación de izamiento, se coló el siguiente tramo de pila con la altura dicha. Ya que se contó con cimbras ajustables por ambas caras de la pila, el espesor del muro se fue ajustando conforme se iba ascendiendo, mientras que la inclinación se conservó según lo marcaba el perfil piramidal del fuste.

La colocación del concreto se efectuó empleando dos tipos de bombas; una estacionaria, cuya potencia permite elevar concreto hasta 300 m verticalmente, y "bombas pluma", aparatos autotrepantes que ascienden conforme avanza la construcción, que reciben el material de la bomba estacionaria y permiten el colado rápido y preciso de la mezcla.

Construcción de la superestructura

En el caso de los tramos de doble voladizo (claros P2-P3 a P6-P7), el proceso comenzó por fabricar sobre el fuste de la pila terminada, a modo de capitel, lo que se conoce como dovela sobre pila. Esta dovela presentó un par de tramos en voladizo por las caras que ven hacia el claro del puente. En su cuerda inferior inician la disminución de peralte que culmina en la dovela de cierre, al centro del claro. En el caso particular de este puente, la losa se realizó con la inclinación necesaria para dar a la calzada de rodamiento su peralte, según la trayectoria curva del puente y las velocidades de operación de la autopista.

Con el auxilio de una grúa torre afianzada por la pila misma, sobre la losa de la dovela se montaron dos carros de colado, dispositivos que se desplazan sobre rieles retráctiles y proporcionan un ámbito de trabajo suficiente para instalar cimbra y armar de una dovela, más la capacidad portante que exige el aparato mismo, las cimbras, el acero de refuerzo y la mezcla de concreto que una dovela consume. Las dovelas se colaron simultáneamente por pares, para asegurar que el conjunto de pila y voladizos quedaran en equilibrio. Una vez que el concreto adquirió el 80% de su resistencia final, se tensaron los cables de presfuerzo, lo que permitió que las dovelas alcanzaran toda la capacidad de mantener la condición estructural de la ménsula requeridas conforme crezcan los voladizos.

Una vez prolongada la dovela sobre pila con un par de dovelas en cada dirección, los carros de colado se deslizaron hasta el extremo de cada extensión sobre sus rieles. Debidamente posicionados, permitieron la fabricación de la siguiente pareja de dovelas; el ciclo se repitió hasta dejar un espacio donde finalmente se coló la dovela de cierre.

Los tramos iniciales del puente, apoyados en los estribos y en las pilas 2 y 7, respectivamente, se fabricaron de sección constante, similar a la de la dovela de cierre y con una longitud de 63.50 m. Para

efectos de cargar con la cimbra, se montó una estructura metálica de armaduras longitudinales y viguetas transversales, con un par de apoyos intermedios cuyo eje se situó asimétricamente con relación al claro, a 24.5 m de cada estribo. Estos apoyos descansan cada uno sobre su zapata, sustentada a su vez por 49 micropilotes.

El peso total de esta estructura es de alrededor de 400 toneladas; soporta unos dos millones de toneladas adicionales, entre acero de refuerzo, mezcla de concreto y unas 20 toneladas de cimbra. La particularidad del caso es que esta estructura presentaba una superficie de trabajo horizontal, sobre la cual se colaron las losas inferior y superior con la inclinación del peralte para la curva.

La secuencia de fabricación comenzó al colocar la cimbra de fondo y las cimbras exteriores, a todo lo largo y ancho del tramo. Se armó la losa inferior y enseguida se instaló el andamiaje para la losa superior, con los preparativos que evitarían que los puntales quedaran atrapados por el concreto de dicha losa, una vez colado. Siguieron los ductos de postensado en la losa de fondo, la cimbra para las caras interiores, el armado de los muros y los ductos para presfuerzo a lo largo de éstos. Los preparativos para el colado terminaban colocando dos armados: los de las riostras (o muros transversales de la sección, sobre el eje de apoyo) y el de la losa superior. Se realizaron colados monolíticos: primero, la losa inferior, seguida de uno y otro muro; después las riostras y al final, la losa superior. La secuencia de fabricación de la superestructura comenzó por los tramos de viaducto, primero el de la margen derecha. Los dobles voladizos se realizaron iniciando por el de la pila No. 3, seguidos por las pilas 4, 6 y 5.

Enfrente: Se dio prioridad a la construcción de la pila No. 5 (la más alta del puente, ubicada en el lecho del río), antes de iniciar la temporada de lluvias para evitar así un retraso de cuatro meses en el programa de obra. Los trabajos de perforación y construcción de pilas coladas *in situ* revelaron condiciones geológicas adversas y corrientes subterráneas que complicaron los trabajos, por lo que se estableció un ágil proceso de retroalimentación entre los equipos de ingeniería y construcción para realizar cambios importantes en la cimentación, afectando lo menos posible el tiempo de ejecución destinado para tales actividades. La pila No. 4 también presentó problemas en el lugar de su cimentación por lo que se tuvo que asegurar muy bien el terreno para evitar deslizamientos. **Arriba:** La labor de trasladar grandes volúmenes de concreto a más de 200 m de altura en forma vertical y casi 100 m en horizontal, tanto para las pilas como para la superestructura, obligó a utilizar los equipos de bombeo considerados como los de mayor potencia hasta el momento. Tenían una capacidad de empuje de concreto de hasta 360 m en un tramo vertical.

Bibliografía

Alarid Villa, Alejandra Yazmín. *Construcción del Puente Chiapas*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Rafael Aburto Valdés. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Acatlán. México, 2006.

Coria Beristain, Gerardo. *Proceso Constructivo del puente Barranca El Zapote*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Distrito Federal. 1995.

Domínguez Aguirre, Alejandro. *Construcción del Puente Viaducto La Marquesa en la remodelación de la carretera México-Toluca*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Fernando Rivas Olvera. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán. México. 1990.

Duarte Aranda, Alfredo. *Estudio de factibilidad Técnica-Económica del Puente Zacatal*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón. México. 1990.

Esturau Escofet, Salvador. *Procedimiento Constructivo del puente Mezcala*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Distrito Federal. 1992.

González Flores, Juan Moisés. *Proceso Constructivo de la cimentación del Puente Tampico*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán. México. 1986.

Guerrero Montoya, Marco Antonio. *Procedimientos Constructivos en la construcción del puente Tampico*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Miguel Montes de Oca. Universidad Anáhuac, Escuela de Ingeniería. Distrito Federal. 1989.

Herrera Borja, Juan. *Inspección Estructural del Puente El Zacatal*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Jesús Palma Rodríguez. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Distrito Federal. 2006.

Jara González, Leonardo. *Ampliación del Puente Grijalva 1 Ubicado en el Km 6+800 de la carretera Villahermosa-Chetumal*. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería. Coatzacoalcos, Ver. 2010.

Orrala Díaz, Luis Gonzalo. *Distribución de esfuerzos en los cables de un puente atirantado debido al tráfico vehicular*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Didier Samayoa Ochoa. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Distrito Federal. 2007.

Perusquia Álvarez, José Luis. *Procedimiento Constructivo del Puente Papagayo*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán. México. 1993.

Rentería Huerta, Oscar Eduardo. *La construcción del Puente Papagayo*. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de la Construcción. Distrito Federal. 1992.

Romo Guzmán, Martín. *Procedimiento Constructivo de la Superestructura del Puente Chiapas 1 a Base de Dovelas de Acero*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Darío Rivera Vargas. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Acatlán. México. 2004.

Salazar Martínez, Raúl. *Procedimiento Constructivo del Puente Quetzalapa*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Rafael Aburto Valdés. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Distrito Federal. 1994.

Santos Briones, Sergio Julián. *Proceso Constructivo de los apoyos del Puente Chiapas*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Roberto Gómez Martínez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Distrito Federal 2001.

T21, Año 7, Vol. 85, Septiembre 2006.

Valencia Cunile, Carlos E. *Construcción y Mantenimiento del Puente Mezcala*. Tesis de Licenciatura. Dirigida por Edmundo Barrera Monsiváis. Universidad la Salle, Escuela de Ingeniería. Distrito Federal. 1998.

Vargas Trejo, Primitivo. *Estabilidad de la cimentación del Puente Barranca El Cañón en la autopista México-Acapulco*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón. Distrito Federal. 1995.

Vector, Especial Caminos, femcic, Año 5 , Número 43, Julio 2012.

Vías Terrestres, amivtac, Año 4, Núm. 28, Mayo-Junio 2013.

Agradecimientos

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes agradece a todas la personas, empresas e instituciones que junto a los distintos Centros SCT aportaron planos, fotografías, memorias y toda clase de documentos para la elaboración de este libro.

Caxcan
Ing. Javier de Jesús Montero Ávila
Ing. David Álvarez Torresvalle

Euroestudios
Ing. Fernando Mohedano Izunza
Ing. Josefina Rivera Maldonado

Freyssinet de México
Ing. Luis Rojas Nieto
Arq. Anik Jean

GECCSA Ingeniería
Ing. Cirio Hernández Sánchez

Grupo Mexicano de Desarrollo
Ing. Francisco Rodríguez Flores

Grupo Omega
Ing. Martín Taylor

Ingenieros Civiles Asociados
Ing. Jorge Delgado
Ing. Carlos de la Mora
Ing. Antonio Ortiz Miranda

IDINSA
Ing. Víctor Ortíz Ensástegui
Ing. José Carmen de León Pérez

JESA
Ing. Jesús Sánchez
Ing. Modesto Armijo

Mexpresa
Ing. José Luis Quintana
Ing. Juan Cuatecontzi Rodríguez

Grupo TRIADA
Ing. Gustavo Rocha Argüeyes
Ing. José Mario Enríquez Garza
Ing. Raúl Ojesto-Martínez García

TRADECO
Ing. Hilario Orozco Unzueta
Ing. Andrés Benton Zavala
Ing. Manuel Salvador Sánchez Núñez
Lic. Jonathan Hernández Orozco

SCT
Ing. Leonardo Guzmán León
Ing. Juan Carlos Capistrán Fernández
Ing. Rubén Frías Aldaraca
Ing. Abraham Morales
Ing. Héctor Armando Castañeda Molina
Ing. Ignacio Enrique Hernández Quinto

Asimismo, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, desea agradecer a todos los centros SCT del país que amablemente contribuyeron con materiales e información para la realización de esta obra.

LOS PUENTES DE MÉXICO, 1985-2014
se terminó de imprimir en mayo de 2015
en los talleres de Offset Santiago, S.A. de C.V.
La edición consta de 2 000 ejemplares
y estuvo al cuidado de GM Editores, S.A. de C.V.

José Ignacio y Carlos González Manterola
Dirección del Proyecto

Noemí González González
Coordinación Editorial

Rodrigo Borja
Noemí Guerrero Lara
Indira Guardiola Cisneros
Diana Rubio Nava
Gloria Saldaña Hernández
Textos

Ofelia Mercado Arzate
Diseñadora Asociada

Jaime Joyner Díaz
Diagramación

Raúl Esquivel
Luis Toledo
Corrección de Estilo

José Ignacio González Manterola
María Inés González González
Fondo Fotográfico sct
Archivos Particulares
Fotografía

Rubén Marrufo Flores
Investigación Iconográfica

Brenda Flores Pérez
Enrique Daniel Soriano Sosa
Eréndira Paz Pérez
Reproducción de Planos

Ernesto Rodríguez Alarcón
Preprensa

Isabel Naranjo Reason
Cuidado de la Edición en Imprenta

Horacio Ocampo Galicia
Administración del Proyecto