

PUENTE BALUARTE

ING. SALVADOR SANCHEZ NUÑEZ
Tradeco Infraestructura S.A. de C.V., México
SSANCHEZ@TRADECO.COM.MX

RESUMEN

El Puente Baluarte, una obra de altas especificaciones con una longitud de 1,124 metros; será la estructura atirantada más grande de América Latina, pues cuenta con una altura a nivel de calzada de 390 metros, que permitirá librar una barranca de esta profundidad con un claro central de 520 metros, y ahorrará tres horas y media de recorrido total de la autopista, ya que actualmente la distancia entre Durango-Mazatlán se recorre en seis horas promedio.

Se trata del puente más importante y emblemático que se haya hecho en la historia de nuestro país, tanto por el reto que se superará con su construcción y porque librar una barranca de este tipo sólo es alcanzable con la tecnología más avanzada y con la conjunción de esfuerzos.

El puente se encuentra en los límites de Durango y Sinaloa. En él continúa la modernización de la autopista Durango-Mazatlán correspondiente al eje carretero Matamoros-Mazatlán, uno de los 14 corredores troncales prioritarios de la red carretera nacional.

El Puente Baluarte se asentará en una zona montañosa y formará parte del corredor carretero número 5, que integra a las ciudades de Mazatlán - Durango - Torreón -Gómez Palacio - Saltillo - Monterrey - Reynosa y Matamoros, entre otras, con una longitud de 1,241 kilómetros

1. ANTECEDENTES

Históricamente podemos decir que las cuatro últimas décadas marcan el inicio de la construcción de puentes con claros grandes en el país. El objetivo fundamental de estas estructuras atirantadas es salvar grandes claros, en orografías complicadas o en zonas de ríos navegables.

Los ejemplos típicos de este tipo de estructuras en México son:

- 1.- El Puente Coatzacoalcos II
- 2.- El Puente Tampico
- 3.- El Puente Mezcala

Finalmente el proyecto al que haremos referencia el día de hoy, el Puente Baluarte (Figura 1), estructura atirantada que será el claro principal más grande en América Latina y la más espectacular y fascinante en su proceso constructivo.

Para hacer una pequeña comparación entre ellos, la tabla no. 1 presenta las principales características de los puentes como la altura de las pilas, la longitud del claro principal, el tipo de construcción y el número de tirantes.

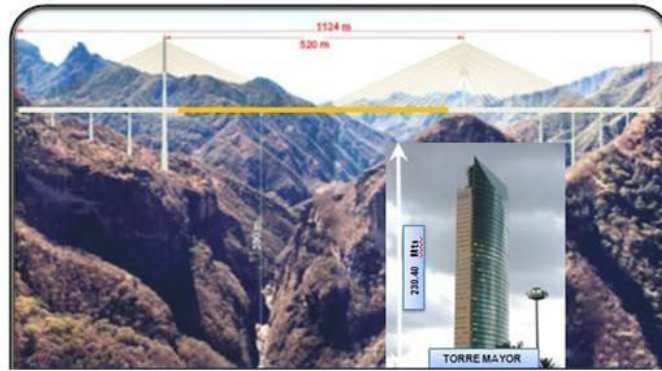


Figura 1 - Puente Baluarte

Cabe resaltar que de estas 4 estructuras el puente mezcala con sus 243 metros de altura en su pila principal y en sus tan solo 24 meses de construcción, es el puente de concreto más alto de México y Latino América.

Tabla 1 - Comparativa entre puentes

| NOMBRE DEL PUEBTE | NUMERO DE PILAS ATIRANTADAS | ALTURA | | LONGITUD DE CLARO PRINCIPAL | CONSTRUCCION TIPO | NUMERO DE TIRANTES |
|-------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|-----------------------------|--|--------------------|
| | | PILA PRINCIPAL | HASTA LA CALZADA | | | |
| Puente Coatzacoalcos II | 2 | 100 m | 36 m | 288 m | Concreto reforzado | 34 |
| Puente Tampico | 2 | 125 m | 48 m | 360 m | Concreto reforzado y acero ortotrópico | 44 |
| Puente Mezcala | 3 | 243 m | 166 m | 312 m | Concreto reforzado y vigas metálicas | 140 |
| | | | | 288 m | | |
| Puente Baluarte | 2 | 101 m | 390 m | 520 m | Concreto reforzado y acero estructural | 152 |

El “Puente Baluarte”, con una longitud de 1,124 metros es parte del corredor carretero numero 5 (figura 2), que integra a las ciudades de Mazatlán – Durango - Torreón – Gómez Palacio – Saltillo – Monterrey - Reynosa y Matamoros, entre otras.

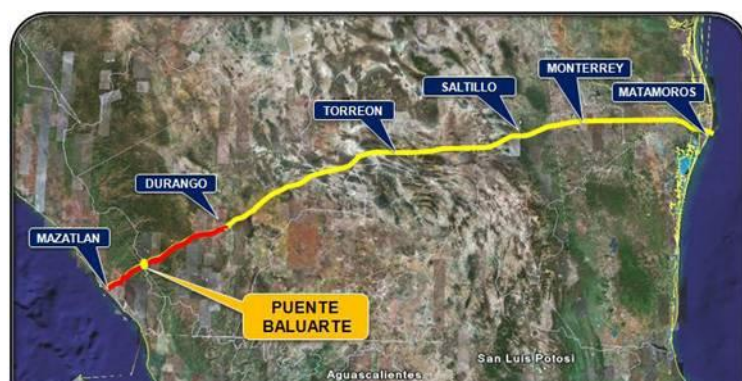


Figura 2 - Localización; eje carretero número 5

El puente salvará una barranca a nivel de calzada de 390 metros y un claro principal de 520 metros como se muestra en la figura 3, el cual permitirá circular a 110 kilómetros por hora y albergará un flujo promedio de 2,000 vehículos por día.



Figura 3 - Perspectiva del puente baluarte

2. CARACTERÍSTICAS Y VOLUMENES PRINCIPALES

Tabla 2 - Características Principales

| DESCRIPCION | CANTIDAD |
|---|------------|
| Longitud total | 1,124 m. |
| Profundidad de la barranca | 390 m. |
| Número de apoyos | 12 . |
| Número de claros | 11 . |
| Claro principal | 520 m. |
| Ancho total | 22 m. |
| Longitud de estructura de acero | 432 m. |
| Longitud de estructura de concreto | 692 m. |
| Altura máxima de pila – pilón (apoyo no. 6) | 101 m. |
| Altura máxima de pilas (apoyo no. 9) | 153 m. |
| Dimensión máxima de zapatas | 18 X 30 m. |
| Tipo de atirantamiento | Abanico |
| Número de tirantes | 152 . |
| Longitud máxima de tirantes | 280 m. |
| Número de torones por tirante | 20 A 47. |
| Pendiente longitudinal | 5 % |

Tabla 3 - Volúmenes principales

| CANTIDAD DE OBRA | TOTAL | UNIDAD |
|---------------------------------|---------|--------|
| Acero de presfuerzo | 848 | Ton |
| Acero de presfuerzo en tirantes | 1,170 | Ton |
| Acero de refuerzo | 11,996 | Ton |
| Acero estructural grado 50 | 4,410 | Ton |
| Concreto hidráulico | 90,388 | m3 |
| Concreto lanzado | 3,886 | m3 |
| Excavaciones en roca | 639,173 | m3 |
| Inyecciones | 2,475 | m3 |

3. INFRAESTRUCTURA

Para lograr el reto de construir el Puente Baluarte – hablando no solo de la estructura misma – se requirió una planeación y logística elaborada con personal especializado de mucha experiencia.

Además de la importancia de llevar adelante en buenos términos el trabajo ingenieril, se presento el reto de construir en una de las orografías más complicadas del país, con la consigna de que lo trabajado en oficina fuese lo más cercano posible a la realidad, y en caso contrario, tener la capacidad de responder con los menores costos y tiempos, debido a la estrechez del programa de ejecución de los trabajos.

Ejemplo de esto es la construcción del camino de acceso (22 Km.), una obra completa dentro del proyecto (figura 4), con un buen paquete de ingeniería detrás, como es la identificación de brechas según la topografía del terreno, estudios de gabinete para la

interpretación de datos para la posterior toma de decisiones en cuanto a las distintas opciones de rutas y la identificación de la volumetría.

Como paso siguiente, el plan de ataque en los distintos frentes de trabajo, los cuales incluirán terracerías, obras de drenaje y revestimiento. Cada una de estas tareas incluye una amplia gama de actividades que necesitan relacionarse entre si para no generar bloqueos, interrupciones o tiempos muertos.



Figura 4 - Camino de acceso

En paralelo a lo anterior se detallan las instalaciones necesarias que servirán para el buen funcionamiento en la construcción de la obra, como son:

Campamentos.- Estos se dimensionan de acuerdo al número de personal que participara en el proyecto, así como oficinas, talleres, almacenes, áreas de esparcimiento, comedores, luz, agua potable e instalaciones sanitarias; en nuestro caso se calcularon 25 edificios entre oficinas, dormitorios, comedores, almacén, taller mecánico, enfermería además de una cancha de futbol, área de estacionamiento, pila filtrante e instalaciones para el buen manejo del agua.

4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL PUENTE BALUARTE

4.1. Cimentación

Una vez terminados los caminos de acceso a cada uno de los apoyos se procede a excavarlos en el orden siguiente:

- Margen Sinaloa.- Se excavarán pilas 12, 11, 10, 6, 7, 8 y 9 por tener la condicionante de una topografía muy accidentada (perfil puente) como se puede apreciar en la figura 5.

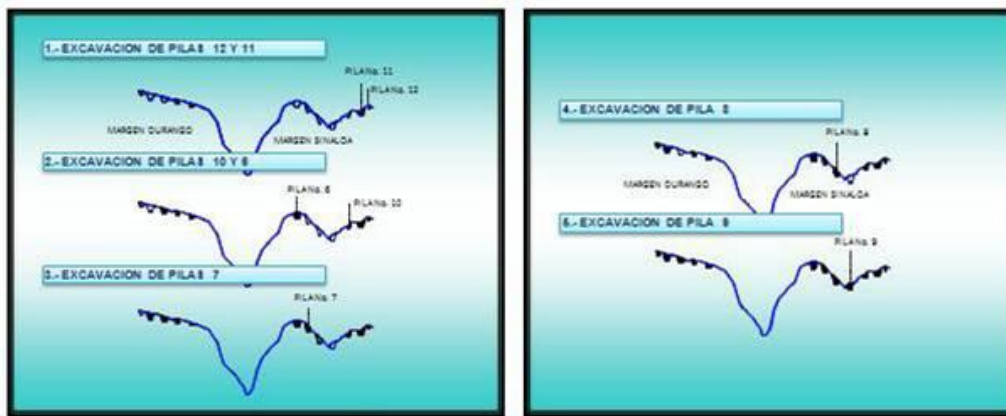


Figura 5 - Secuencia de excavaciones en margen Sinaloa

El procedimiento de excavación es barrenar a 6 metros de profundidad y diámetro de 3" Ø con equipo de perforación track drill; una vez que se tienen diseñadas las plantillas de barrenación (cuadrículas) se calcula la cantidad de explosivo que se pretende utilizar por m³ de material; terminada la barrenación del área correspondiente se procede a cargar el explosivo suficiente para dar la fragmentación del material requerido para su fácil manejo al retiro del mismo.

Ejecutada la voladura se rezaga el producto de la misma y una vez que se termine se proceda a barrenar para el siguiente ciclo para desalojar los 6 metros del nuevo evento y así sucesivamente hasta llegar al desplante de las zapatas. Para el retiro del material se usa un tractor, retroexcavadora y camiones de volteo. En paralelo a esta actividad se hacen los anclajes en los taludes, y de requerir el terreno protección o estabilización se coloca concreto lanzado y malla electrosoldada, en algunos casos se complementa con malla de triple torsión.

- Margen Durango.- El orden de excavación será pilas 5, 4, 3, 2, 1 y se hará de la misma forma descrita para los apoyos del lado Sinaloa, como se muestra en la figura 6.

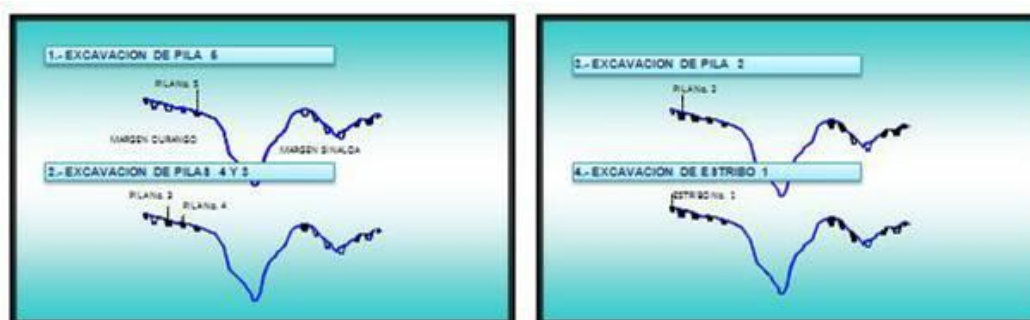


Figura 6 - Secuencia de excavaciones en margen Durango

Concluidas las excavaciones a nivel de desplante de los apoyos se procede a colar una plantilla de concreto y posteriormente se coloca el armado de las zapatas con el acero de refuerzo previamente habilitado, de acuerdo al proyecto, respetando la geometría indicada en los planos de construcción. Paso siguiente se coloca cimbra donde se requiera, para finalmente hacer la colocación del concreto con el "F'c" que corresponda al elemento en cuestión (figura 7).



Figura 7 - Armado y colado de zapatas

Para colocar el concreto puede ser por gravedad (tiro directo), con bomba o con grúa de construcción y bacha, al momento de estar vaciando el concreto, este se acomodara con vibradores de inmersión y estos pueden ser de combustión, eléctricos o neumáticos.

Finalmente al pasar 8 horas como mínimo se podrá retirar la cimbra y colocar la membrana de curado sobre la cara del elemento terminado, evitando con esto la presencia de grietas generadas por el calor al estar fraguando el concreto.

4.2. Subestructura

Construcción de los cuerpos de pilas de los apoyos 1 al 4 y del 7 al 12 (figura 8).

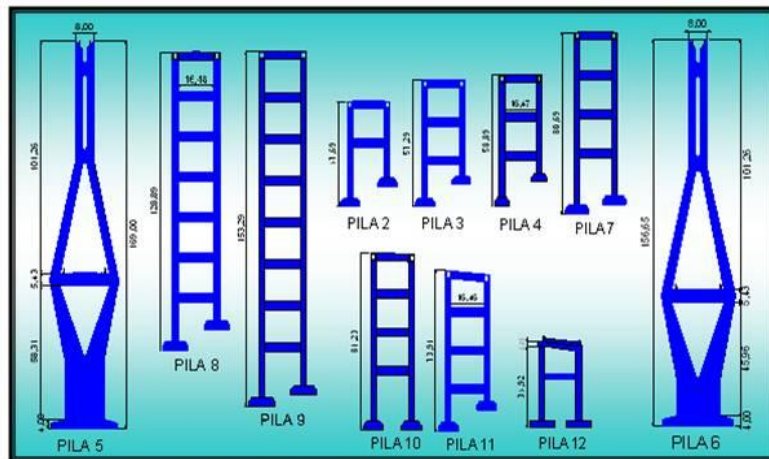


Figura 8 - Altura de pilas

Para la construcción del cuerpo de pilas de los apoyos secundarios se utilizara cimbra trepadora con una altura de 5 metros (figura 9), siendo el proceso de la manera siguiente:

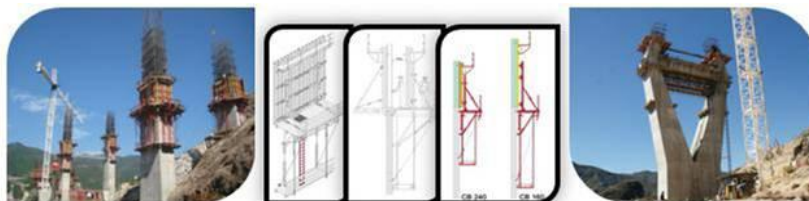


Figura 9 - Utilización de cimbra trepadora en pilas

- En la margen Sinaloa se empezara con el apoyo 12, 11, 10, 6, 7, 8 y 9, siempre llevando en forma simultánea dos apoyos a la vez, hasta terminar la pila a la altura del proyecto en tramos de 5 metros e ir colocando las traveses intermedias que unen las columnas que forman la pila, estas se ubican a cada 15 metros de altura.

Para lograr lo anterior se coloca primeramente el acero de refuerzo de acuerdo a proyecto, terminado el tramo de 5 metros se procede a colocar la cimbra, se alinea

y se fija con los dispositivos con los que cuenta el molde, se colocan piezas especiales previas al colado, para que sirvan de anclaje al molde en el siguiente movimiento (figura 10).



Figura 10 - Armado y colado en apoyos

Cumpliendo con lo anterior se procede a colocar el concreto con el auxilio de una grúa de construcción, cubeta para concreto (bacha) y vibradores de inmersión para darle compacidad al concreto; esto se repite hasta terminar la pila a la elevación del proyecto, el rendimiento que se tiene es de hacer 7.5 metros lineales de altura de pila por semana. Finalmente cuando se tiene el fraguado del concreto se retira el molde y se coloca la membrana de curado.

- En la margen Durango el orden de ejecución de las pilas es del apoyo 4, 3, 2, 5 y estribo 1, realizando todo lo anteriormente descrito.

4.3. Construcción de pilas principales

A continuación se construirán los cuerpos de los pilones 5 y 6 para los cuales se tendrá equipo de construcción independiente, simultáneamente se iniciará y concluirá la construcción de las pilas 12, 11, 10, 4 y 3, además del estribo 1, a medida que se vayan construyendo los cuerpos de las pilas 8 y 9 deberán colocarse retenidas indicadas en los planos de proyecto.

Las Pilas principales 5 y 6 se construirán en 3 etapas (figura 11) como se describen a continuación:

1ª. Etapa.- Se inicia el armado del cuerpo de pila de la sección rectangular hasta la elevación de proyecto colocando el molde con altura de 5 m., se alinea y troquela la cimbra para proceder a colocar el concreto con el uso de la grúa torre o de construcción y bacha, vibrando el concreto en capas de 30 o 50 cm. para lograr su compacidad, esperar el fraguado del concreto aproximadamente 10 hrs. y retirar el molde o cimbra, para iniciar el ciclo siguiente, y así sucesivamente hasta terminar con la altura de proyecto.

2ª. Etapa.- Se inicia el armado de los brazos de la pila, se coloca el molde para hacer colados de 3 m. verticales; se coloca el concreto de la misma forma que se explico anteriormente hasta llegar a la altura del cabezal...

3ª. Etapa.- Se inicia con el mástil o "Y" invertida con el mismo proceso de la etapa anterior hasta llegar al cierre de los brazos inclinados y de esa elevación se inicia la parte recta del mástil, hasta llegar a la altura que marca el proyecto; para esto se tiene que dejar previamente embebidos los ductos por donde se anclaran los tirantes.

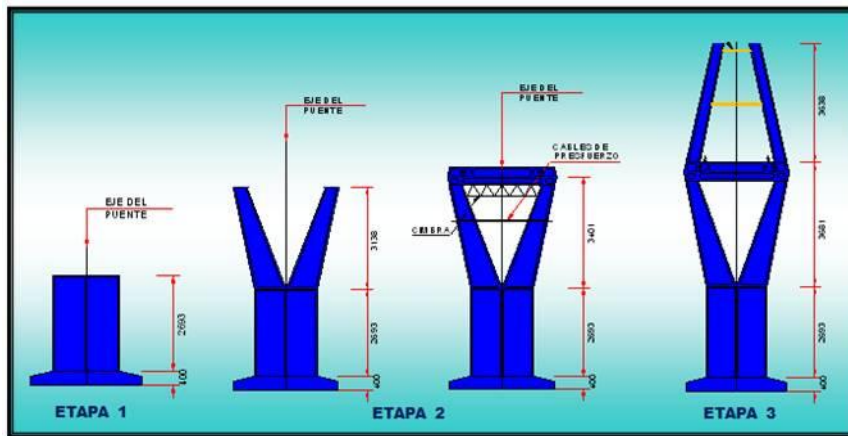


Figura 11 - Etapas de construcción de pilas 5 y 6

4.4. Construcción de Superestructura

El viaducto de baluarte contiene 170 dovelas en hormigón, 150 estarán situadas entre pilas secundarias y serán construidas in situ con carros en doble voladizo y 20 dovelas hacia el claro principal.

Cada dovela tiene una longitud de 4 metros, la geometría general es dada en la figura 12. Enseguida se construirán las dovelas de pila de los apoyos 5 y 4, así como 6 y 7, incluyendo el elemento transversal horizontal que une las dos columnas (trabe eje de pila), hecho lo anterior se montarán los carros de colado para colar los cajones en doble voladizo iniciando con la dovela 1 (D1).

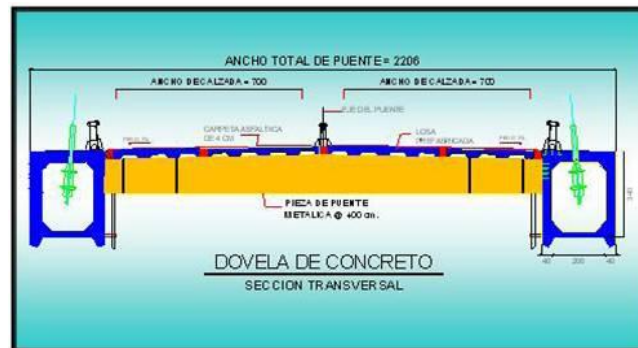


Figura 12 - Dovelas de concreto

La construcción de los doble voladizos empiezan con un pre-ensamble del carro de avance (figura 13), este se efectuará en el piso para minimizar el impacto sobre la duración del proyecto y reducir las actividades en altura.

Una vez que el pre-ensamble y la dovela sobre pila estén acabados, se izará el carro de avance en la cumbre de la pila en posición para colar la primera dovela. Se efectuarán pruebas y verificaciones para asegurar que el carro está conforme con las expectativas y capaz de sostener la carga futura.

Con la ayuda de la grúa levantamos e instalamos el conjunto prefabricado: refuerzo y encofrado interior. El refuerzo en zona de traslape se instala y amarra in situ. Se instalarán ductos y trompetas para el presfuerzo e instalaremos el encofrado interior en la zona de traslape. Instalaremos el encofrado de la parte frontal y se procederá con el hormigonado después de la validación por el control de calidad.

Durante el curado del hormigón, la parte frontal se desencofra, se instalan los cables y los anclajes, se prepara el tensado y se instalan los rieles de lanzamiento del carro. Una vez que el hormigón ha adquirido la resistencia requerida, podemos proceder al tensado y al desencofrado. El carro está listo para efectuar su primer lanzamiento. Según los resultados del consultor para el control geométrico, nivelamos y configuramos el carro.

Trabajamos de manera simultánea al otro lado de la pila para restablecer el equilibrio. Las dovelas son pos-tensadas de manera definitiva por cables de presfuerzo anclados en el hormigón. La operación se repetirá, guardando continuamente el equilibrio por cada lado de la pila, hasta el cierre del tramo. Posteriormente el carro se desmonta y queda disponible para ser utilizado sobre otra pila.

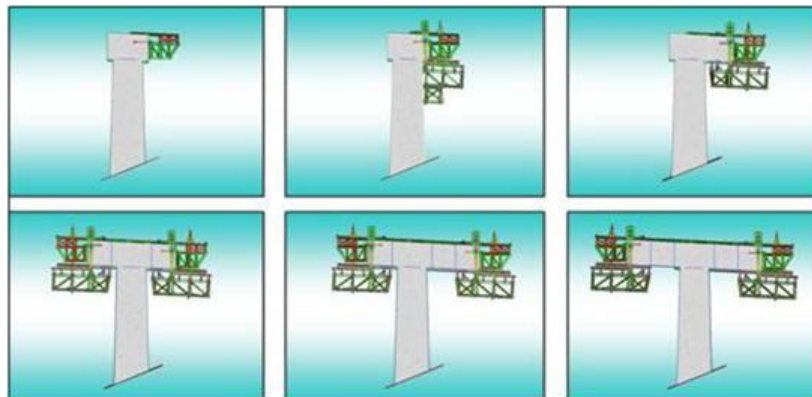


Figura 13 - Construcción de doble voladizo

Existen otras actividades fuera del ciclo de construcción: como la inyección de lechada en las vainas de presfuerzo, el tensado de los cables de continuidad, el montaje de las vigas metálicas y todo el tablero, etc.

Simultáneamente se construirá la obra falsa y cimbra apoyados en el terreno natural para llevar a cabo la construcción de la dovela de orilla junto al estribo No. 1 y la pila No. 12 la cual estará en espera del avance en doble voladizo desde pila no. 2 y pila no. 11, respectivamente; se han puesto 20 carros de colado, 10 en cada extremo del puente, en esta fase se iniciará la construcción de los cuerpos de las pilas 3, 8 y 9 usando la cimbra liberada de las pilas 5, 4, 7 y 6. A medida que se vayan construyendo los cuerpos de las pilas 8 y 9 deberán colocarse las retenidas indicadas en los planos del proyecto.

4.5. Construcción de dobles voladizos

Continuando el avance de construcción de cajones de superestructura (figura 14) se irán construyendo las dovelas D2 hasta la D8, desde las pilas 5, 4, 3, 7 y 6 excepto en pila 8 que tiene hasta D7 y que en la pila 9 se llega hasta D9.



Figura 14 - Construcción de doble voladizo

4.6. Construcción de dovelas de cierre en doble voladizo

A continuación se llevan a cabo los colados de las dovelas de cierre (figura 15), en el tramo 1 – 2 se usará el carro que viene de pila 2 en el tramo 2 – 3 también se usará el carro que viene 2 – 3 y los carros que fueron montados en pila 3 serán desmontados en esta fase para utilizarse en otra pila.

Para el tramo 11 – 12 se usará el carro que viene de pila 11, en el tramo 10 – 11 se usará el que viene de pila 10 y los carros que vienen de pila 11 serán desmontados para usarse en otra pila. Cabe mencionar que primero se debe cerrar el tramo 10 – 11 para luego continuar con el tramo 11 – 12 en voladizo con las dovelas D6 y D7, para finalmente efectuar el cierre 11 – 12, haciendo mención que en esta fase se concluyen las partes inferiores de los pilones 5 y 6, incluyendo la dovela de pila, la cual es también la riostra del pilón, a nivel del tablero.



Figura 15 - Dovelas de cierre en doble voladizo

4.7. Construcción de dobles volados en pilas principales

Enseguida se construirán las dovelas de pila de los apoyos 10, 8 y 9, incluyendo el elemento transversal horizontal que une las dos columnas de la pila, después se iniciará el montaje de los carros de colado para el doble voladizo desde las pilas 10, 8 y 9 deberán alcanzarse la dovela D7 desde la pila 8, la dovela D7 desde pilón 5, la dovela D9 desde pila 9, en el caso del doble voladizo desde los pilones 5 y 6 (figura 16), estas serán coladas conforme se avance en el doble voladizo.

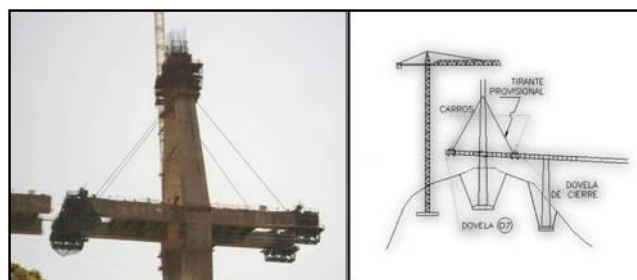


Figura 16 - Construcción de dobles volados en pilones 5 y 6

También deberá observarse que en estos voladizos del pilón 5 y del pilón 6, al llegar a la dovela no. 6 deberán instalarse y tensarse los tirantes provisionales, como se muestra en la figura 17. En esta fase se deberá continuar con la construcción de las patas inclinadas del pilón 5 y 6, debiendo utilizar un puntal a 18.50 m. de altura sobre el nivel de la superestructura y otro a 34.50 m. sobre el mismo nivel, a fin de evitar que se flexione la pata hacia el eje del puente, y en todo caso aplicarle al puntal una fuerza hacia afuera que coloque a la pierna en la posición teórica de proyecto, el avance en la construcción del pilón queda limitado a no más de 36.50 m. arriba de la rasante, sin haber colocado el

segundo puntal, en esta fase deberá procederse a colar las losas que van apoyadas sobre la trabe longitudinal y las piezas de puente.

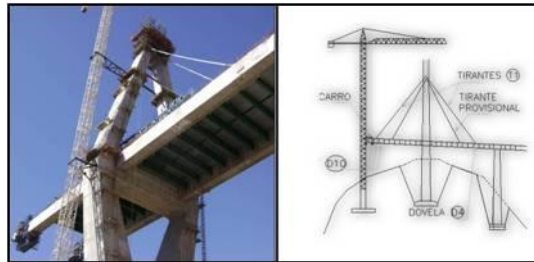


Figura 17 - Colocación de tirante provisional

Estas se transportarán en carritos sobre rieles colocados sobre los cajones del doble voladizo; en todos los casos y en cualquier parte del puente, se hace la aclaración de que las losas serán coladas in situ, usando perfiles monten entre piezas de puente como cimbra perdida.

4.8. Construcción de dovelas en claro central

Construcción de las dovelas de concreto en claro central (tabla 4) y colocación de tirantes provisionales. Una vez concluida la construcción de las 9 dovelas de concreto en voladizo se coloca el tirante provisional en la dovela 6 y el tirante 1 definitivo en dovela 9, en ambas pilas principales 5 y 6.

| DESCRIPCION | DURACION |
|---|----------|
| Colocación de acero de refuerzo y armado de cimbra | 1.50 día |
| Nivelación, instalación y lanzamiento del carro de avance | 1.00 día |
| Colocación de tubos | 0.50 día |
| Colado | 0.50 día |
| Fraguado | 1.00 día |
| Ciclo Dovela Puente Baluarte | 4.50 día |

Tabla 4.- Ciclo de construcción de una dovela típica

4.9. Construcción de dovelas metálicas en claro central

A partir de esta fase la superestructura de concreto cambia a ser de acero (figura 18) para formar dovelas de 12 metros, con 2 vigas extremas longitudinales de 12 metros, 3 traveses (piezas puente) transversales de 20 metros, con losa de concreto en el piso de rodamiento, así como un tirante por cada modulo de doce metros.



Figura 18 - Dovela metálica

El ciclo de construcción (figura 19) descrito brevemente sería:

- Se coloca individualmente cada viga de doce metros de la dovela longitudinal.
- Deberá verificarse el alineamiento y nivelación de la pieza.
- Se colocan las piezas de puente transversales (3) conectadas a las vigas.
- Se colocan largueros y se checan los torques de todos los tornillos.
- Se engancha la dovela metálica al dispositivo de lanzado.
- Se transporta por el interior de la viga lanzadora y al llegar al extremo se gira la dovela y se ubica en posición.
- Se atornilla y se checa el torque.
- Se instala el tirante N+1
- Se da tensión inicial al 30% de la fuerza.
- Se coloca perfil monten.
- Se arma la losa y se cuela.
- Una vez que se tenga el 80% del "F'c" del concreto se complementa el tensado del tirante al 100% de su fuerza correspondiente.

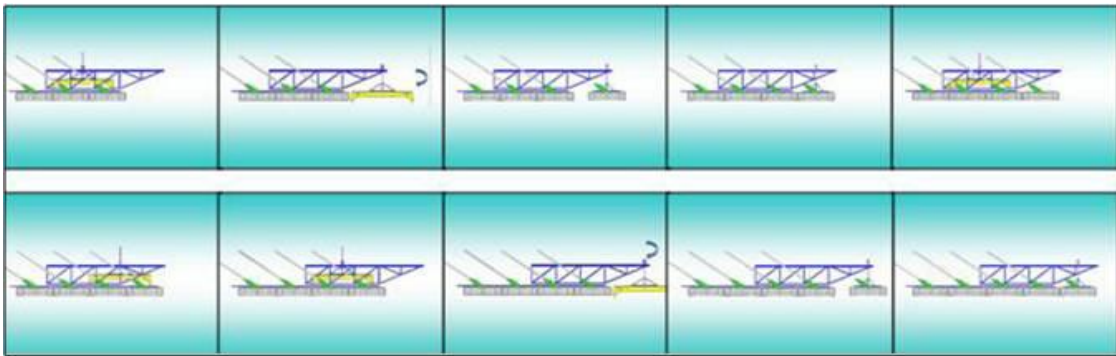


Figura 19 - Ciclo de construcción en claro central

4.10. Cierre de claro central

Realizado lo anterior se desplaza el equipo de montaje a la posición del siguiente ciclo y se acercan los elementos para sujeción. Esto será repetido sucesivamente hasta haber logrado el montaje del tirante T19.

Se realiza el cierre de tramo 5 - 6 (figura 20) montando los elementos de la dovela de cierre:

- Trabe extrema de un metro de longitud.
- Colocar el acero de refuerzo de la losa
- Efectuar el colado de la misma.

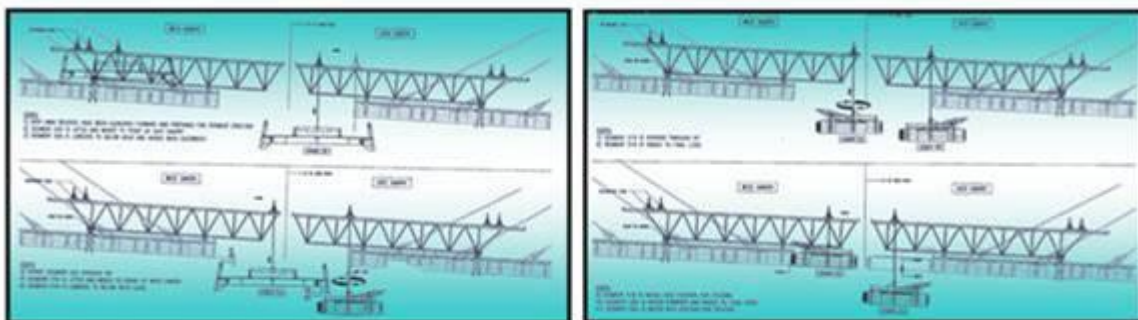


Figura 20 - Cierre de claro central

4.11. Montaje de tirantes y descripción de elementos

4.11.1. Componentes de los Tirantes

El sistema de tirantes está constituido de torones tensados entre los pilones y el tablero. Cada conjunto de torones constituyen un tirante estando protegido por un ducto "pead" al cual se refiere como vaina. Los torones sujetan las cargas del tablero del puente y las transmiten a los pilones por medio de los anclajes en cada extremo.

- Torones.- Se utilizarán torones de 5/8" de diámetro formados por 7 hilos, límite de relajación 1770 mpa, galvanizados, revestidos con vaina de "pead".
- Anclajes de tirantes.- Se ocuparán anclajes de tipo 6-22, 6-31, 6-37 y 6-43. los anclajes ajustables (activos) están situados en los pilones. los anclajes pasivos están en el tablero.
- Vainas.- Ensamble de elementos de aproximadamente 11.8 m de ducto de "pead", unidos por termo fusión y contando con manga de expansión al nivel del pilón y elemento de conexión al tubo anti-vandalismo al tablero. el diámetro de vainas varía de 160 mm a 200 mm.

4.11.2. Equipos y Herramientas

La instalación de los tirantes se desarrolla según el método "strand by strand". Este método requiere los recursos descritos a continuación. Se presentan solamente los principales equipos necesarios para la instalación de los tirantes.

- Grúas Torre.- Para levantar la vaina y amarrarla en la configuración requerida para la instalación de los torones.
- Soldadora de Ductos.- Para la fabricación de la vaina, se sueldan elementos de aproximadamente 11.8 m de largo conocido como termo fusión.
- Huinches.- Ubicados dentro de los pilones, se usan para izar los torones desde los dispensadores situados en el tablero, dentro de la vaina, hacia los anclajes del pilón.
- Equipos de tensado.- Una vez que el torón está instalado en sus dos anclajes, se aplica la fuerza requerida por medio del sistema de isotensión. Este equipo se compone de un Gato Hidráulico monotorón, una Bomba Hidráulica con manómetro y una célula de control (figura 21).
- Equipo para inyección de los anclajes.- Por medio de dos bombas (presión y vacío) y un calentador, se inyecta cera en los anclajes de tirantes, después de terminar su instalación.
- Equipo para clavado de cuñas.- Esta operación se realiza con un gato hidráulico, se empujan las cuñas dentro de los anclajes para prevenir el deslizamiento de los torones.



Figura 21 - Sistema de Isotensión

4.11.3. Procedimiento de instalación de los tirantes

A continuación se describe de manera general el procedimiento de instalación de los tirantes para una comprensión global de la operación. Cada fase de dicha operación se detalla en los procedimientos particulares referenciados a continuación:

Secuencia general de la operación de instalación de los tirantes.- La operación de instalación de los tirantes se completa en dos fases.

- Fase 1.- Instalación inicial de los tirantes.- Para la instalación inicial de los tirantes “n” durante el doble voladizo, la secuencia general de la operación se explica en la forma siguiente:
 - Al tablero y al pilón: La instalación de los tirantes (n-1) está terminada.
 - En el tablero de concreto: Las dovelas de los tirantes “n” están en condición adecuada (el concreto alcanzó una resistencia suficiente, no existen interferencias entre carros de colados o encofrados y tirantes, todos los equipos y material necesarios están instalados en posición correcta).
 - Al tablero metálico: Las dovelas metálicas están correctamente montadas y el tablero esta en condición adecuada para instalación de los tirantes.
 - Al pilón: La zona de los anclajes de los tirantes “n” esta en condición adecuada (el concreto alcanzo una resistencia suficiente, no existen interferencias entre encofrados y equipos para instalación de los tirantes, las plataformas de trabajo están listas).
- Fase 2.- Puesta en configuración final de los tirantes.- Una vez que la estructura cuenta con todas las cargas permanentes (pavimentos, parapetos, etc.) empieza la operación de puesta en configuración final de los tirantes, cuya secuencia describiré a continuación.
 - El tablero está terminado (incluido pt exterior).
 - Cargas permanentes en estructura.

4.11.4. Instalación de los anclajes de los tirantes

Los anclajes de tirantes (figura 22) son prefabricados y ensamblados en un taller especializado.

- Al pilón:- Los anclajes pueden ser instalados una vez que la construcción del pilón lo permite, sin relación con la construcción del tablero.
- Al tablero de concreto:- La instalación de los anclajes se incluye en el ciclo de construcción del tablero en doble voladizo.
- Al tablero metálico:- Los anclajes pueden ser instalados en las dovelas metálicas después del montaje de las vigas longitudinales.

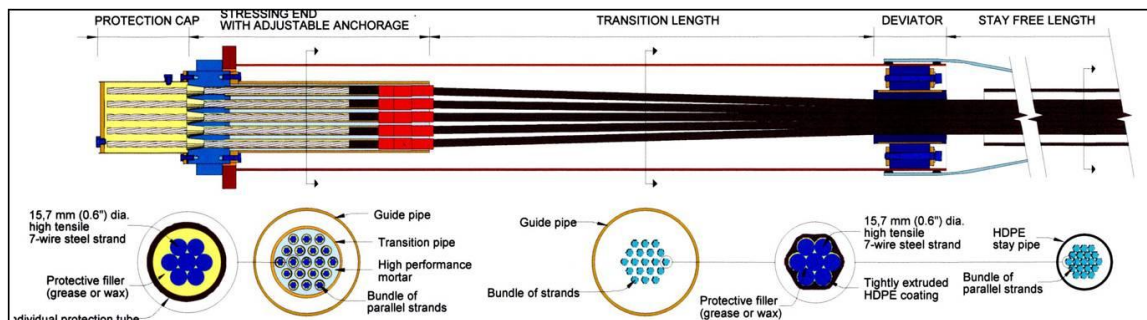


Figura 22 - Anclaje de tirante

Fabricación de las vainas.- Las vainas son fabricadas a partir de elementos de aproximadamente de 12 metros de largo. Estos elementos son soldados juntos en una zona reservada del tablero. El primer torón (master strand) está instalado dentro de la vaina. Las vainas terminadas son almacenadas en el tablero hasta su instalación.

4.11.5. Instalación de las vainas

Las vainas se instalan en la configuración requerida para la instalación de torones por medio de las grúas torres de los pilones (figura 23).



Figura 23 - Instalación de vainas

La grúa se desconecta una vez que la vaina este amarrada al pilón y el tablero con tecles/eslingas.

4.11.6. Instalación de los torones

El primer torón de cada tirante se instala junto con la vaina. Los siguientes se instalan según el método “strand by strand”. Por medio de huinches, ubicados en los pilones, se izan los torones uno por uno desde los dispensadores situados en el tablero, dentro de la vaina, hacia los anclajes del pilón. Una vez que el torón haya pasado en sus dos anclajes, se aplica la fuerza especificada por medio de un gato hidráulico.

Durante la fase de construcción del claro central, la tensión de los tirantes se realiza en tres etapas.

- Tensado inicial.- se realiza después de que la dovela metálica ha sido liberada por la viga lanzadora en su posición final.
- Tensado intermedio.- se efectúa una vez que ha sido colada la losa de rodamiento de concreto. Posterior a este tensado se obtiene la geometría de la estructura y se compara con la geometría teórica para la etapa de construcción correspondiente.
- Tensado final.- se realiza para alcanzar la geometría deseada. Para cada fase de tensado (y construcción) se verifica que los niveles de esfuerzos a los que trabajan los tirantes no superen 0.45 del esfuerzo de ruptura de los tirantes (F_{pu}). De igual manera se verifica que los esfuerzos bajo cargas permanentes no sean mayores a 0.40 F_{pu} .

La secuencia de instalación de los torones de tirantes es la descrita a continuación. Se refiere al conjunto de 4 tirantes anclados en el pilón a la misma altura como grupo de tirantes (2 lados tierra, 2 lado agua, cada lado dividido en dos bordes: exterior e interior del tablero):

- En cada borde del tablero, se instalan los torones del grupo de tirantes en secuencia alterna entre lado agua y lado tierra del pilón (1 torón – 1 torón).
- La etapa de tensado inicial debe completarse para los bordes interior y exterior del tablero antes de iniciar la etapa de tensado intermedio.

4.11.7. Instalación de los desviadores y amortiguadores

Los desviadores y amortiguadores (figura24) se instalan después de terminar la fase de ajuste final de las fuerzas de los tirantes.

- Clavado de cuñas.- Con un gato hidráulico se empujan las cuñas dentro de los anclajes para prevenir el deslizamiento de los torones.
- Del lado pasivo del tirante. Esta operación se puede hacer después de terminar la fase 1 de instalación de los tirantes. del lado activo se hace una vez que se haya completado el ajuste final de las fuerzas de los tirantes.
- Protección final de los tirantes.- La protección final consiste en todos los trabajos necesarios para garantizar una protección a largo plazo de los tirantes contra las agresiones del medio exterior.
 - Corte de la punta de los torones.
 - Instalación de las tapas protectoras en los anclajes.
 - Inyección de cera en los anclajes.
 - Cierre de las vainas.

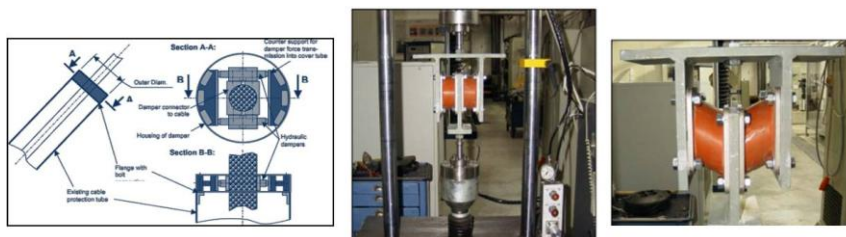


Figura 24 - Sistema de amortiguador de fricción

4.12. Sistema de control de vibraciones

El puente Baluarte es una estructura muy flexible (período de vibración del orden de 4 seg.) y en consecuencia sensible a diversos fenómenos vibratorios. Los cables de atirantamiento presentan longitudes importantes (comprendidas entre 60 y 280 m) y en consecuencia una flexibilidad elevada. Cuando dichos cables están sometidos a una excitación periódica pueden (bajo ciertas condiciones) acumular energía y oscilar con amplitudes importantes. En general, este tipo de oscilaciones no pone en peligro la estabilidad de la estructura, pero, en caso de no ser controladas, pueden ocasionar temor en los usuarios del puente y daños por fatiga en los tirantes. Existen tres tipos principales de fenómenos que pueden generar vibraciones en los tirantes:

- Desplazamiento de los anclajes de los tirantes bajo el efecto de cargas de tráfico o viento actuando sobre el puente (pilones y tablero),
- Efectos del viento actuando directamente sobre los tirantes,
- Excitación combinada por el fenómeno lluvia-viento. Bajo ciertas condiciones, la lluvia puede generar una "película" de agua que cambia la forma aerodinámica de la funda de protección de los tirantes, lo que ocasiona que bajo la acción del viento se puedan generar vibraciones.

En el caso del puente Baluarte, para controlar estas vibraciones se tomaron las siguientes precauciones:

- Introducción de amortiguadores de tipo fricciónate en los anclajes inferiores de los tirantes (Figura 25). Estos dispositivos permiten disminuir considerablemente las oscilaciones en los tirantes generadas por el movimiento de la estructura y/o el viento actuando directamente sobre los tirantes.
- Empleo de fundas de protección para los tirantes con filetes en espiral a lo largo del mismo (Figura 26). El perfilado de los tubos funda impide la formación de la "película" de agua alrededor de los mismos en condiciones de lluvia y en consecuencia permite evitar fenómeno lluvia-viento.



Figura 25 - Amortiguador de Fricción



Figura 26 - Tubo funda de tirante con espiral

Con las precauciones antes mencionadas se limitó la aparición de los diversos fenómenos vibratorios en los tirantes conforme a lo indicado en diferentes códigos de diseño internacionales.

4.13. Trabajos finales

Se desmontan los equipos de colocación de traveses longitudinales y piezas de puente y se procede a construir guarniciones, parapetos y carpeta asfáltica en la losa de rodamiento.

4.14. Inspección de elementos

Inspeccionar todos los elementos del puente como por ejemplo: Verificar protecciones finales de los anclajes, verificar la tensión final de los cables, instrumentar pruebas de carga, verificar resultados correctos y se autoriza la entrada en servicio del puente.