

Reacondicionamiento puente 8 Colombia: sustitución de apoyos elastoméricos por apoyos pendulares

Retrofitting bridge 8 Colombia: replacement of elastomeric bearings with pendular bearings

Pablo Vilchez Motino^a, David Calderón Sanz^b, Lisandro Pérez^c

^a Ingeniero Industrial. Freyssinet S.A.U. Director Técnico. pablo_v@freysinet-es.com

^b Ingeniero Civil. Freyssinet S.A.U. Ingeniero Departamento Técnico. david_c@freysinet-es.com

^c Ingeniero Civil. Freyssinet Colombia S.A.S Director general B.U./Colombia. lisandro.perez@freysinet-tierraarmada.co

RESUMEN

Durante la ejecución del tramo “Puente 8” de la autopista Pacífico 1, se detectó que los apoyos elastoméricos instalados no cumplían bajo los esfuerzos a compresión, optando temporalmente por instalar una cama de arena sobre cabeza de pilas alrededor de los apoyos actuales para redistribuir las cargas verticales que solicitaban éstos. Para solventar las deficiencias encontradas sin modificar las solicitaciones de diseño de las pilas construidas, se planteó la sustitución de los neoprenos por aisladores, considerando tanto las condiciones de carga, rigidez y desplazamiento, como las limitaciones de espacio en la pila, y el procedimiento de sustitución. Por ello se optó por la disposición de apoyos pendulares.

ABSTRACT

During the construction of the “Puente 8” section of the Pacific 1 highway, it was found that the installed elastomeric bearings did not comply with the compression stresses. Temporarily, it was decided to install a sand bed on the top of the piers around the current supports to redistribute the vertical loads that they required. To solve the deficiencies found in the support devices without modifying the design requirements of the constructed piers, the replacement of the neoprene already installed by isolators was proposed, considering load conditions, stiffness, displacement, spatial constraints at the pile location, and the replacement procedure. Consequently, the implementation of pendulum bearings was chosen.

PALABRAS CLAVE: reacondicionamiento, equipamiento, apoyos pendulares, recentrado, sismo.

KEYWORDS: retrofitting, equipment, pendulum supports, recentering, earthquake.

1. Introducción

Por parte de Conpacifico (Concesionaria Vial del Pacífico) se realizó el proyecto de la autopista de conexión Pacífico 1 en el año 2019, donde se integran la realización de una serie de puentes, entre ellos el Puente 8.



Figura 1. Alzado del puente 8

Durante la ejecución del tramo “Puente 8” se detectó que los apoyos elastoméricos proyectados e instalados no cumplirían los esfuerzos a compresión a los que se verían solicitados por la estructura, por lo que se optó por instalar una cama de arena sobre la cabeza de pilas alrededor de los apoyos actuales para redistribuir las cargas verticales que solicitaban éstos mientras se rediseñaban los nuevos apoyos a instalar y se sustituían por los actuales.

Los condicionantes para el diseño de los nuevos apoyos a instalar eran:

- No modificar las solicitaciones de diseño de las pilas construidas.
- Respetar las condiciones de carga, rigidez y desplazamiento de diseño.
- Considerar las limitaciones de espacio en la pila.

Con estos condicionantes, se optó por la disposición de apoyos pendulares, los cuales transmiten la carga vertical del tablero a las pilas, tienen rigidez lateral positiva frente al desplazamiento horizontal y capacidad de recentrado longitudinal del tablero en caso de sismo. Aunque ambas tipologías tienen la función de proporcionar soporte y permitir el movimiento relativo de la estructura, tienen características diferentes que ofrecen ventajas específicas dependiendo de la aplicación.

Esta operación de sustitución de apoyos se llevó a cabo por parte de Freyssinet Tierra Armada Colombia, presentando a continuación el procedimiento llevado a cabo junto con la descripción de los equipos empleados.

2. Descripción de la estructura

El puente objeto de estudio consta de tres vanos hiperestáticos (figura 2), siendo los vanos extremos de unos 63 m de longitud, por los 125 m de longitud del vano central. La estructura del puente consta de dos estribos laterales y dos pilas centrales de unos 44 m de altura libre de fuste sobre los que descansa el tablero.

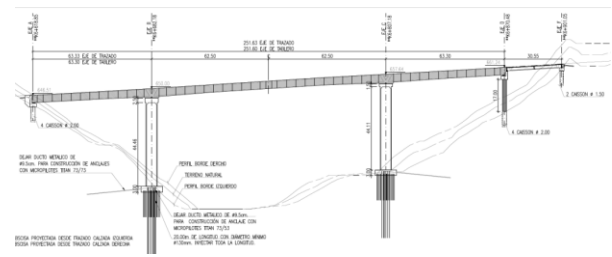


Figura 2. Perfil del puente 8

La ejecución del tablero se llevó a cabo a través de la ejecución de dovelas de 22 m de ancho y longitudes variables a lo largo de los tres vanos que componen el puente. La plataforma consta de un único tablero, en el que se integran las dos calzadas independientes, una para cada sentido de circulación.

Ambos estribos están formados por cuatro pilas de longitud variable, coronadas por un dintel que enlaza las cuatro pilas, y que a su vez sirve para la ubicación de los apoyos de tablero en cabeza, sobre los que descansan las vigas que componen la plataforma e, ambos sentidos (figura 3).

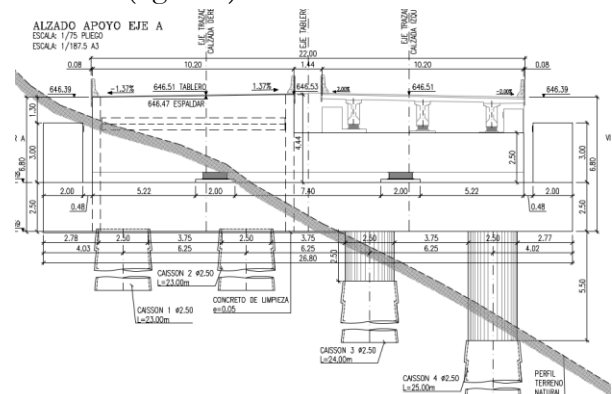


Figura 3. Sección transversal de estribo

En la cara vertical de este dintel que corona las pilas que forman los estribos, se ejecutó in situ una ménsula de hormigón de 2 m de ancho, sobre la que se realizarán las operaciones destinadas a la sustitución de los apoyos elastoméricos existentes actualmente en estribo.

El fuste de las pilas tiene unas dimensiones exteriores en planta de 6 m x 6 m, existiendo en cabeza de pila un macizado de 1,50 m de canto, y unas dimensiones en planta de 7,45 m de ancho (perpendicular al eje de la plataforma) por 7 m

de longitud (en dirección del eje de la plataforma).

En la zona de transferencia de carga tablero-pila donde se ubican en cabeza de pila los apoyos, existe en un diafragma rígido sobre cada apoyo en forma de “V” embebido en el canto del tablero (figura 4), formado por dos almas de 1.50 m de espesor cada una y siguiendo el sentido longitudinal de la plataforma.

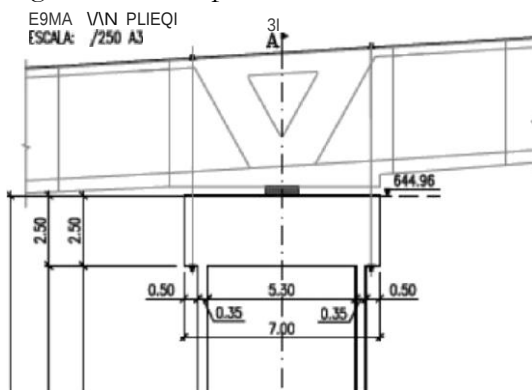


Figura 4. Sección longitudinal de pila

La altura libre existente entre la cara inferior del tablero y la cara superior de cada pila es de 30 cm (figura 5), siendo esa altura la disponible para la colocación de equipos, calzas...

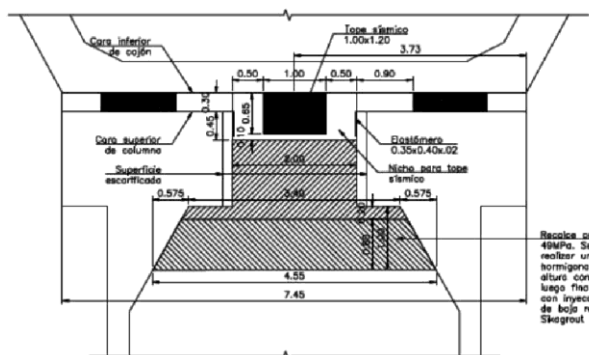


Figura 5. Sección transversal de pila

3. Cargas de levantamiento

Por parte de Freyssinet se solicitaron las cargas teóricas estimadas para el dimensionamiento de los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de levantamiento del tablero, cargas que fueron suministradas por Pedelta como proyectista (tabla 1):

Aislador	Eje	Fuerza de compresión (t=inf)	Fuerza de compresión sin carpeta asfáltica
1	A	5,736	5,212
2	A	5,433	5,174
1	B	26,647	22,998
2	B	26,756	23,013
1	C	29,844	25,072
2	C	29,611	25,070
1	D	5,531	5,188
2	D	5,896	5,217

Tabla 1. Cargas de levantamiento estimadas

Además de estas cargas, se realizó la evaluación del incremento de carga que se generaría en cada uno de los apoyos producto del levantamiento individual de los mismos, obteniéndose una reacción adicional de 840kN en las pilas centrales (ejes B y C) y de 252kN en los estribos (ejes A y B). Estas reacciones se deberían sumar a los valores dados en las tablas anteriores.

4. Equipos de levantamiento

Las cargas que se han empleado para el dimensionamiento de los equipos hidráulicos destinados al levantamiento han sido:

- Carga levantamiento estribo = 5,217 kN + 252 kN = 5,469 kN.
- Carga levantamiento pila = 25,072 kN + 840 kN = 25,912 kN.

4.1 Equipos hidráulicos

En base a la experiencia de Freyssinet en este tipo de operaciones, el coeficiente de seguridad empleado para calcular la capacidad de los cilindros debe ser al menos de 1.5, por lo que el gato seleccionado deberá tener una capacidad mínima de en torno a 4,100 kN (420 t).

Partiendo de las cargas de levantamiento anteriores y considerando la premisa anterior, para realizar la operación se propone la utilización de cilindros hidráulicos del tipo 500 VER 50E (figura 6) ya que las cargas y presiones obtenidas son viables con la utilización de este

dispositivo, teniendo un coeficiente de seguridad por encima del mínimo propuesto



Figura 6. Cilindros empleados

4.2 Distribución cilindros

El número de cilindros a emplear en la operación de levantamiento en cada estribo y pila serían:

- Cilindros en estribo 7' apoyo: 2 cilindros por apoyo (4 cilindros por estribo, figura 7).
- Cilindros en pila 7' apoyo: 10 cilindros por apoyo (20 cilindros por pila, figura 9).

Los dos cilindros hidráulicos por apoyo planteados en estribo se colocarán en cabeza de este, a ambos lados de los apoyos existentes, y dejando el espacio suficiente para la realización de la operación de cambio de apoyos planteada.

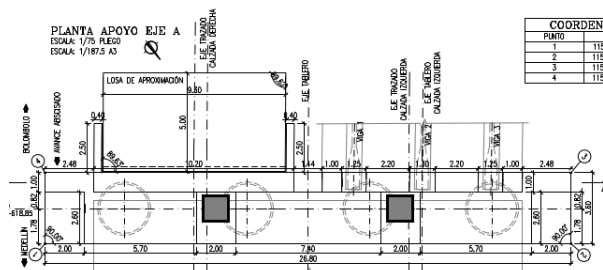


Figura 7. Disposición sobre estribo

Al existir un macizado general en la culata de vigas sobre cabeza de estribo, se garantiza la

correcta transmisión de esfuerzos en la operación de levantamiento.

En el caso de los cilindros a ubicar en cabeza de pila (figura 8), estos se colocarán en los bordes longitudinales de la pila, a continuación de las calzas provisionales instaladas, y dejando una separación a borde de 15 cm y una distancia entre ejes de cilindros de 32.5 cm.

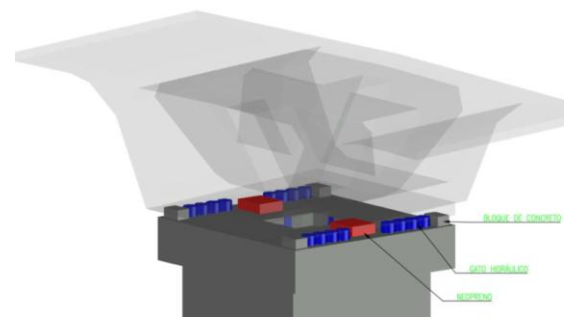


Figura 8. Disposición sobre pila

Con esta configuración conseguimos que:

- Al realizar la puesta en carga de los cilindros, estos reaccionan directamente contra el alma de la Viga cajón actual.
- Conseguimos una mejor distribución de presiones en viga y pila.
- Dejamos el espacio necesario para la extracción de los apoyos existentes y posterior colocación de los nuevos apoyos.
- Las presiones de trabajo que se obtienen con esta configuración son relativamente bajas, con lo que se consigue un margen de seguridad interesante.

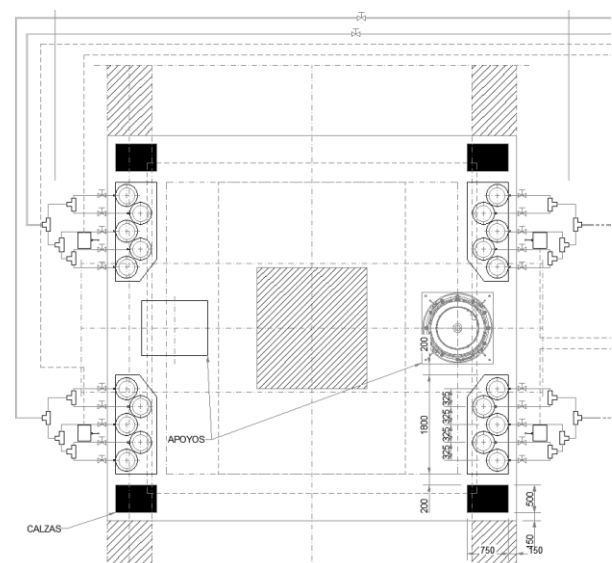




Figura 9. Disposición cilindros sobre pila

4.3 Comprobación equipos

Para la estimación de presiones en cilindros se ha realizado la comprobación de la viabilidad de la disposición de cilindros sobre pila y estribo. Considerando esta distribución las presiones obtenidas son:

		Carga KN	Presión bar
Pila	Esperada	25,320	347
	Alerta	29,110	398
	Parada	31,640	433
Estribo	Esperada	6,410	439
	Alerta	7,370	499
	Parada	8,010	548

Tabla 2. Presiones estimadas

De los resultados de presiones obtenidas basadas en la distribución de cilindros planteada en cada caso (tablas 2 y 3), se puede apreciar que la presión teórica de trabajo que se alcanza a partir de las cargas teóricas definidas por Pedelta no llega en ningún caso a los 450 bar (máxima), cuando los cilindros hidráulicos planteados pueden llegar a trabajar hasta a 700 bar.

4.4 Sistema hidráulico de alta precisión

Para el levantamiento del tablero se utilizará un sistema hidráulico compuesto por cilindros de alta capacidad y un sistema autómatas de levantamiento sincronizado de alta precisión (figura 10):



Figura 10. Sistema LAO

Sus principales propiedades son:

- Control de fuerzas y desplazamientos con precisiones de 5% y 0.1mm respectivamente.
- Interfaz de usuario mediante pantalla táctil y seguimiento de valores en tiempo real.
- Capacidad de grabación y registro de datos para su posterior análisis.
- Sistema de desplazamiento sincronizado con alarmas y paros automáticos en función de diferencia de izado en sincronía alarma y paro definidas.
- Rango sensores de posición: 0 — 500 mm.
- Rango transductor de presión: 0 — 690 bar.

Lectura de Fuerzas para usuario evitando transformaciones de unidades durante la ejecución en obra.

- Sistema modular de elevación para controlar hasta 16 puntos hidráulicos (un punto hidráulico puede estar formado por uno o varios cilindros)
- Puede conectarse a cilindros de simple o doble efecto con la misma o diferentes capacidades de elevación o carreras.
- Sistema controlado con unidad de potencia hidráulica integrada.

Se exige, pues, el control y monitorización en tiempo real del proceso de levantamiento (cargas y desplazamientos) durante la operación de izado y descenso, con control individualizado de cada uno de los cilindros hidráulicos.

Para el control del desplazamiento del tablero durante la fase de levantamiento se dispondrán sensores magnéticos de desplazamiento tipo “Magnetek“, cuya precisión es de 0.1 mm.

La composición de estos sensores es la siguiente (figura 11):

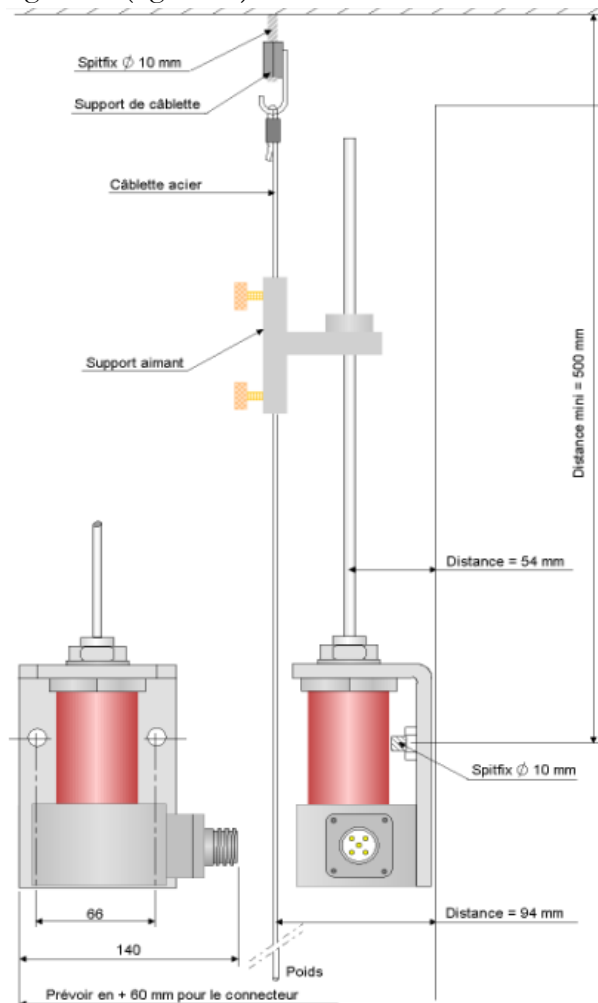


Figura 11. Sensores desplazamiento

5. Definición nuevos apoyos

Durante la fase de ejecución del tramo “Puente 8” de la autopista de conexión Pacífico 1, Pedelta realizó la revisión de los apoyos elastoméricos prediseñados para dicho tramo, encontrando que los apoyos en los ejes A, B, C y D no cumplirían los esfuerzos a compresión bajo los cuales estarían sometidos, razón por la cual se decide rediseñar los apoyos en los ejes A y D y sustituir los apoyos ya instalados en los ejes B y C una vez se lleve a cabo el cierre de la superestructura.

Ya que los apoyos elastoméricos sobre pilas estaban instalados, se optó para redistribuir las cargas verticales que solicitaban los apoyos

por instalar una cama de arena (figura 12) sobre la cabeza de pilas junto con los apoyos actuales y así disminuir los esfuerzos sobre los apoyos, de tal manera que parte de las cargas verticales solicitantes fueran transmitidas directamente a pila a través de esta cama.

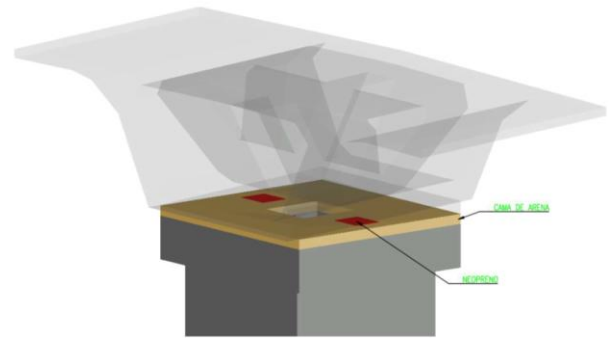


Figura 12. Cama de arena

Tras esta comprobación realizada por Pedelta, se definen las cargas y desplazamientos estimados para el dimensionamiento de los nuevos apoyos, obteniéndose tanto para SLS como ULS y en combinación sísmica, remitiendo además de la carga de compresión (cuyo valor máximo era de 47,026 kN) los valores de cortante longitudinal (4,186 kN), cortante transversal (3,021 kN) y desplazamiento de 36.5 cm en combinación sísmica.

A partir de estas solicitaciones y desplazamientos, por parte de Freyssinet se ha realizado el dimensionamiento de apoyos tanto para pila como para estribos, optando por la disposición de apoyos pendulares (figura 13) tanto en estribo como en pila, considerándola como la tipología idónea en este caso.

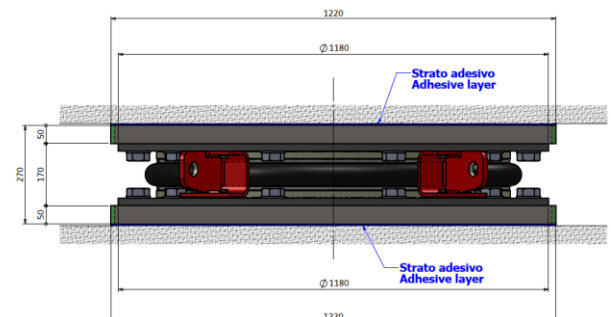


Figura 13. Apoyos pendulares

Las características de estos nuevos apoyos son (tabla 3):

Description		PS 46250/360	PS 15600/1250
		4 PIERS	4 Abutments
Maximum static vertical load ULS	kN	46,250	13,400
Average vertical dead load	kN	28,300	5,550
Maximum seismic vertical load	kN	46,200	15,600
Minimum seismic vertical load	kN	14,050	9
Thermal displacement	mm	±1.4	±6.1
Irreversible displacement	mm	±2.5	±10.5
Offset displacement	mm	±3.2	±13.6
Design seismic displacement	mm	±117	±407
Maximum seismic displacement	mm	±180	±625

Tabla 3. Características apoyos pendulares

A continuación, se detallan las principales ventajas de un apoyo pendular frente a un apoyo elastomérico:

- **Mayor capacidad para permitir desplazamientos horizontales:** este tipo de apoyo es especialmente eficaz para permitir desplazamientos horizontales grandes sin perder capacidad de carga. Los apoyos pendulares son muy útiles en estructuras que requieren un gran grado de libertad de movimiento, como en puentes que están sometidos a movimientos horizontales importantes debido a las fuerzas sísmicas o térmicas, frente a los apoyos

elastoméricos, cuya capacidad de desplazamiento horizontal es más limitada.

- **Durabilidad en ambientes extremos:** Los apoyos pendulares son muy resistentes y duraderos en ambientes extremos, como aquellos con grandes variaciones térmicas o condiciones sísmicas, ya que no dependen de materiales elastoméricos que puedan degradarse con el tiempo debido a factores ambientales (como la temperatura, la humedad o los rayos UV).

- **Capacidad para soportar grandes cargas:** Los apoyos pendulares tienen una gran capacidad para soportar grandes cargas verticales y horizontales debido a su diseño, que generalmente incluye una base esférica o cilíndrica, lo que distribuye las cargas de manera más eficiente. Los apoyos elastoméricos son adecuados para cargas moderadas, pero no tienen la misma capacidad de carga que los apoyos pendulares, ya que dependen de la deformación del material elastomérico, que tiene un límite en términos de resistencia.

- **Menor mantenimiento a largo plazo:** Al estar compuesto generalmente por materiales metálicos o resistentes a la corrosión, los apoyos pendulares requieren menos mantenimiento que los elastoméricos, los cuales pueden sufrir desgaste o pérdida de elasticidad con el tiempo, especialmente bajo condiciones de alta carga o temperatura.

- **Eficiencia en estructuras grandes:** Los apoyos pendulares son más adecuados para estructuras grandes y complejas que requieren un control preciso de los movimientos horizontales y verticales. Su capacidad de adaptación a grandes movimientos es una ventaja en estos casos.

- **Reducción de los esfuerzos internos en la estructura:** Al permitir desplazamientos horizontales sin generar grandes esfuerzos internos en la estructura, los apoyos pendulares pueden ayudar a reducir los esfuerzos adicionales y las deformaciones no deseadas en la estructura.

En general, los apoyos pendulares tienen ventajas cuando se trata de estructuras grandes, grandes desplazamientos horizontales, capacidad de carga elevada y resistencia a condiciones extremas.

6. Medios auxiliares

El acceso a la plataforma de trabajo se realizará desde el tablero actual a través de una escalera situada en uno de los vértices del andamio propuesto. Pese a la restricción de disponer una plataforma de trabajo adecuada en uno de los lados, en los tres lados en los que no se ubica el andamio principal se propone la ejecución de una pasarela de 1,5 m de ancho, para así conseguir que todo el perímetro de la pila sea registrable. Así conseguimos tener una superficie adecuada para realizar todos los trabajos previos necesarios de cara a la operación de levantamiento y extracción de apoyos planteada.

El andamio principal se encuentra colgado (figura 14) del tablero mediante la ejecución de barras pasantes en éste, de tal manera que la carga debe ser soportada completamente por la estructura, estando a su vez fijado a la cabeza de pila para evitar desplazamientos horizontales. Estos anclajes a pila, para evitar coacciones a la hora de realizar el levantamiento de la estructura, deben permitir desplazamientos verticales.

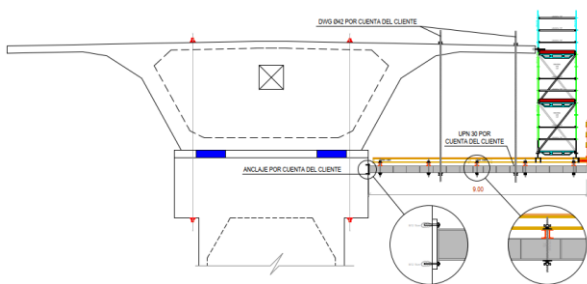


Figura 14. Sección de andamio empleado en pila

Tanto la extracción como la colocación de los nuevos apoyos se realizó únicamente por uno de los costados de la pila. Para ello se facilitó en el andamio un carril central reforzado, sobre el que se colocará el carro de extracción con el cual se llevaron los apoyos desde el extremo del andamio hasta la cara de pila, para su colocación.

Para la realización de los trabajos en estribo, se ejecutó una ménsula en cabeza de estribos (figura 15), de tal manera que desde dicha ménsula se pudo realizar la operación de extracción y reposición de apoyos, así como la limpieza y preparación de superficies.

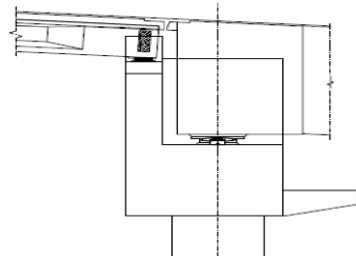


Figura 15. Sección de andamio empleado en estribo

7. Procedimiento de actuación

Previo a la realización de levantamiento y cambio de apoyos en pilas y estribos se realizaron las siguientes tareas:

- Retirada de cama de arena y colocación de calzas provisionales en esquinas.
- Preparación y nivelación de base para la colocación de los cilindros hidráulicos.
- Colocación de andamio y pasarela perimetral.
- Ejecución de carro de extracción en carril especial de andamio ejecutado.

El procedimiento de sustitución seguido fue:

- Colocación de cilindros y montaje del circuito hidráulico (figura 16).

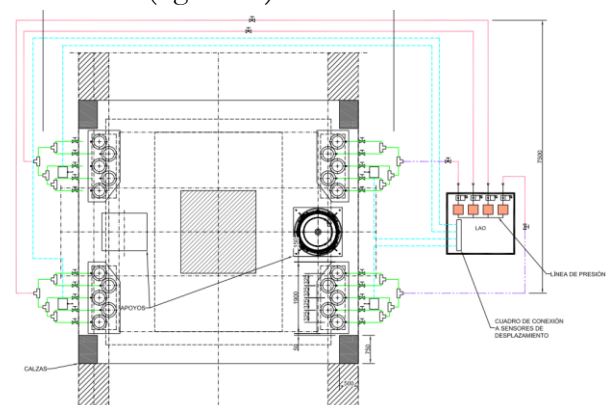


Figura 16. Montaje circuito en pilas

- Levantamiento de tablero (estimado en 1 cm)
- Retirada de apoyos existentes (figura 17).



Figura 17. Retirada de apoyos elastoméricos

- Descenso de nuevos apoyos desde tablero sobre carro (figura 18).



Figura 18. Descenso de apoyos

- Colocación de nuevos apoyos en zona definitiva (figura 19).



Figura 19. Colocación de apoyos.

Al no disponer de casquillos empotrados en cabeza de pilas y estribos para la disposición de pernos de anclaje, se optó por realizar la fijación de los nuevos apoyos pendulares mediante resina en cara superior e inferior, realizando el vertido el lateral del apoyo que da a la junta de dilatación, ubicando las purgas en la cara contraria, sellando a su vez los dos laterales restantes. Previo al vertido de esta resina se realizó un ensayo a escala real, simulando las condiciones de vertido y geometría existente, para así verificar que el vertido y posterior distribución de la resina se realizaba de forma completa y homogénea, dentro de su “pot live”.

El espacio existente entre placas y estribo o tablero era mínimo, por lo que la nivelación se realizó con tornillos.

- Retirada de calzas provisionales
- Colocación de encofrado perimetral a placas y vertido de resina de fijación (figura 20).



Figura 20. Vertido de resina.

- Descenso de estructura sobre los nuevos apoyos pendulares (figura 21).



Figura 21. Vertido de resina.

- Retirada cilindros hidráulicos

Agradecimientos

Desde Freyssinet queremos transmitir nuestro más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, con su incansable esfuerzo, compromiso y dedicación, hicieron posible la realización de los trabajos desarrollados, garantizando que se llevaran a cabo de manera eficiente y dentro de los plazos establecidos. Su colaboración ha sido fundamental para alcanzar los objetivos propuestos, y, en especial, queremos reconocer a: Conpacífico (Concesionaria Vial del Pacífico), Pedelta Ingeniería estructural y a Grupo ULMA.

Referencias

- [1] *AASHTO guide Specifications for Seismic Isolation Design* (2014).
- [2] *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2012).
- [3] *Planos de proyecto “Autopista conexión Pacífico 1. Unidad funcional 1”*. Mayo 2020.