

# Particularidades de la ejecución y medios auxiliares de los viaductos de acceso del nuevo puente de Pumarejo

## *Particularities of the execution and ancillary facilities of the access viaducts of the new Pumarejo bridge*

David Ruiz Melo<sup>\*, a</sup>, Rüdiger Spengler<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero Civil, Especialista en estructuras (mdavidruiz@gmail.com). Universidad Nacional de Colombia. Especialista estructural Consorcio SES.

<sup>b</sup> Ingeniero Civil. Universidad RWTH Alemania (rspengler@sacyr.com). Responsable departamento de Estructuras Obra Civil en SACYR

### RESUMEN

El nuevo puente Pumarejo, construido en la ciudad de Barranquilla (Colombia) entre Agosto de 2015 y Diciembre de 2019, consta de un vano principal atirantado de 380m de luz, una longitud total entre estribos de 2173m y un ancho de tablero variable entre 35.10 y 38.10m convirtiéndose en el puente con el segundo tablero más ancho y el mayor vano atirantado de Colombia. Este artículo resume los aspectos más relevantes de la construcción de los viaductos de acceso los cuales tienen longitudes de 633m y 770m en las márgenes izquierda y derecha del río Magdalena, respectivamente.

### ABSTRACT

The new Pumarejo bridge, built in the city of Barranquilla (Colombia) between August 2015 and December 2019, consists of a main span of 380m, a total length between abutments of 2173m and a variable deck width between 35.10 and 38,10m becoming the second widest deck bridge and the longest cable stayed span of Colombia. This article summarizes the most relevant aspects of the construction of the access viaducts which have lengths of 633m and 770m on the left and right margins of the Magdalena River, respectively.

**PALABRAS CLAVE:** Puente, atirantado, cimbra autolanzable, Barranquilla.

**KEYWORDS:** Bridge, cable stayed, movable scaffolding system, Barranquilla.

## 1. Introducción

El nuevo Puente Pumarejo construido en la ciudad de Barranquilla, Colombia, cruza el río Magdalena a 20 km de su desembocadura al mar Caribe y conecta los departamentos de Magdalena y Atlántico. Su ejecución se inició en el mes de agosto de 2015 y finalizó en diciembre de 2019.

El antiguo puente fue ejecutado en 1974 por las constructoras Cuellar Serrano Gomez y Lodigiani, y fue diseñado por el ingeniero italiano Ricardo Morandi. El nuevo puente logra aumentar el galibo del cruce sobre el canal navegable permitiendo el paso de embarcaciones de mayor envergadura y ampliando la calzada

vehicular de 1 a 3 carriles por sentido y el paso peatonal de 1 metro a 3.20m de ancho.

El puente consta de un vano principal atirantado de 380 metros ejecutado con carros de avance, y viaductos de acceso con luces de 70 metros ejecutados mediante autocimbra. Los carros de avance y la autocimbra ejecutaban secciones de 16m de ancho y mediante carros de alas se ejecutaban los volados laterales llevando la sección a su ancho total, variable entre 35.10 y 38.10 metros.

## 2. Método constructivo en viaductos de acceso

Se ejecutaron 8 vanos por cada margen mediante una autocimbra de 1500 toneladas de peso,

vaciando en sitio secciones cajón de 16 metros de ancho y 70 metros de longitud. Para el montaje inicial de la autocimbra se construyó un terraplén provisional de más de 18000 m<sup>3</sup>, tras el estribo del lado Barranquilla, sobre el cual se apoyó en torres de carga provisionales, la viga principal de la estructura cuya longitud era de cerca de 133m y pesaba cerca de 1200 ton (peso sin encofrados ni estructuras laterales).

Una vez realizado el montaje de la autocimbra con sus correspondientes pruebas de locomoción, se avanzó sobre el primer vano ejecutado sobre cimbra total, (vano 25) y se colocó en posición de hormigonado del primer vano a ejecutar (vano 24), desde el cual se izaron las estructuras laterales y encofrados, cuyo peso total era alrededor de 300 toneladas.





Figura 2. Montaje de autocimbra lado Barranquilla

Las cargas sísmicas y acciones eólicas sobre la autocimbra como tal, condicionaron el diseño del tablero y pilas así como su sistema de transmisión de cargas a la infraestructura, estando limitado su avance a vientos de hasta 40 km/h. Acorde a esta limitación, se presentaron suspensiones de los avances por los fuertes vientos en los meses de agosto, diciembre y enero midiendo en algunos casos vientos hasta de 120 km/h a la altura de operación de la autocimbra.

Sobre la estructura principal de la autocimbra se instalaron anemómetros para evaluar

velocidades de viento, los cuales disparaban sistemas de alarma en caso se superase los rangos normales para su operación. Se dispusieron también sistemas de ubicación a tiempo real por GPS, para facilitar el avance, ripado y posicionamiento de la estructura acorde a los planos de diseño.

Cada vano de autocimbra ejecutado seguía el siguiente ciclo de actividades, el cual tardaba entre 21 y 28 días en promedio:

- Hormigonado de la sección de losa inferior y hastiales. (Sección U)
- Eliminación de cables verticales provisionales en pila. ( $f_c \geq 20$  MPa)
- Corte mediante hilo de diamante de los apoyos provisionales del vano ejecutado.
- Tesado parcial de cables parabólicos y cables inferiores de la sección U.
- Ejecución de losa superior
- Tesado total de cables inferiores y parabólicos de la sección cajón.
- Desactivación del sistema OPS (Organic Prestressing System – sistema de pretensado de la autocimbra para compensar la flecha por el peso del hormigón) y apertura de encofrados.
- Avance de la autocimbra a su siguiente fase de ejecución.



Figura 3. Autocimbra en posición de hormigonado.

Posteriormente a la ejecución de la sección cajón con la autocimbra, y con dos vanos de desfase mínimo como condicionante de diseño, se trasladaba el carro de alas completando la sección total de tablero, que en la margen izquierda variaba entre 29.75m y 38.10m.



Figura 4. Vista aérea carro de alas.

Una vez terminadas las alas laterales de cada vano, se procedía al tesado de los cables superiores de la sección cajón, finalizando así la sección completa de cada uno de los vanos.



Figura 5. Carro de alas en viaductos de acceso

### 3.1 Interferencias con diferentes frentes de obra.

En la margen izquierda del tablero, se proyectó conectar dos ramales vehiculares, los cuales condicionaron la ejecución de los vanos 25 y 21, siendo este último de particular atención en las maniobras de avance de la autocimbra. La cercanía de la pila 1.20 del ramal 1 a la zona de paso de la autocimbra, junto con el condicionante de la curvatura del trazado, obligo a realizar varios ripados de compleja ejecución para lograr avanzar la autocimbra del vano 21 al vano 20, sin suspender las actividades de ejecución de las pilas del ramal.

De similar forma, el carro de alas en la margen izquierda, planteaba interferencias con la construcción del tablero del ramal 1, por lo cual fue necesario adelantar su posición desde la última fase del vano 24 (fase 5), hasta la fase 3 del vano 22. Con ello se logró acoplar la estructura del ramal 1 con la sección cajón del vano 21 sin que ello interfiriera con la ejecución de las alas laterales.

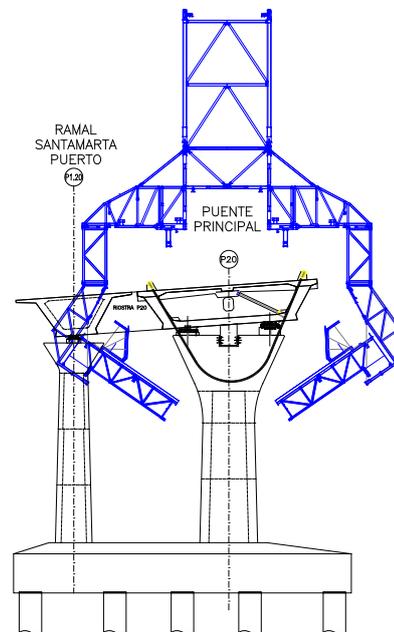


Figura 6. Interferencia en avance de autocimbra.



**Figura 7. Autocimbra en avance a vano 21.**



**Figura 8. Autocimbra en avance a vano 21.**

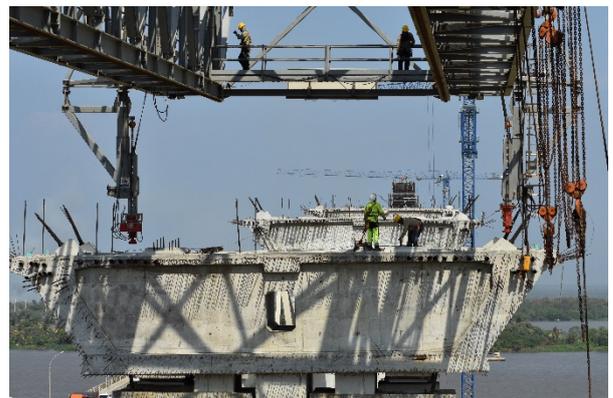
La concepción inicial de la estructura requería la ejecución de la totalidad de los vanos de acceso de 70 metros de luz mediante la autocimbra, sin embargo dada la complejidad de plazos de obra, fue necesario ejecutar dos vanos con cimbra total (vanos 2 y 3) previendo la interferencia que podría suceder entre los carros de avance del costado de retenida del tramo atirantado y la autocimbra en posición de hormigonado del vano 11 (último vano de la margen derecha)



**Figura 9. Autocimbra en vano 11.**

A raíz de la selección de una autocimbra superior para la ejecución del tablero, y dada la magnitud de la sección a ejecutar, se definió el apoyo delantero de la autocimbra sobre una sección parcial de tablero ejecutada previamente sobre los cabeceros de las pilas, denominada dovelas cero, o mamparos.

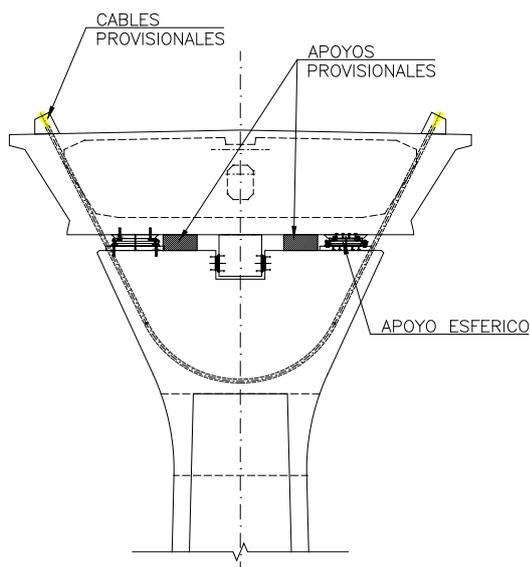
Bajo la sección de dovela cero se encontraban los apoyos deslizantes esféricos definitivos del tablero, los cuales permiten giros y desplazamientos en sentido longitudinal. Debido a ello, el sistema propiamente no era estable para el paso de la autocimbra, razón por la cual se requirió de un sistema de fijación provisional que transmitiera las cargas a las pilas garantizando la estabilidad del paso y ejecución de vanos con la autocimbra.



**Figura 10. Dovela sobre pila, previo a lanzamiento**

verticales de cosido, con el fin de garantizar la resistencia del sistema de transmisión de cargas (tanto las cargas verticales del peso propio de la autocimbra y el concreto fresco como posibles cargas horizontales debido al viento y al sismo durante la construcción).

Las dovelas cero tenían los 16 metros de ancho de la sección cajón a ejecutar con autocimbra y 3.40 metros de longitud. Con un volumen de 156 m<sup>3</sup>, se tenían cuantías de acero entre 400 y 600 kg/m<sup>3</sup>, lo cual dificultaba aún más su ejecución, interfiriendo el armado con las vainas de pre-esfuerzo y los anclajes temporales de fijación de la autocimbra. Se requirió el uso de vibradores de pared en las caras de los encofrados, como complemento a los usuales vibradores de aguja.



Acorde a la secuencia de ejecución de vanos, los apoyos provisionales de concreto reforzado, se debían desconectar de la estructura una vez la sección U adquiriera 20 MPa de resistencia. Para realizar este trabajo se debieron adaptar plataformas inferiores a la autocimbra, donde se instalaban los equipos de corte con hilo de diamante.



Se ejecutaban dos cortes por apoyo, desvinculando completamente la dovela cero del cabecero, lo cual garantizaba el cambio de sistema estructural transfiriendo las cargas directamente a los apoyos esféricos. Una vez terminada esta actividad, junto con el retiro de los cables verticales provisionales, se procedía con la primera fase de tesado de los cables inferiores y parabólicos de la sección del vano en ejecución.

### *Prueba de fricción para cables parabólicos de tesado.*

Con el fin de verificar los coeficientes de fricción por curvatura y por colocación empleados en el proyecto estructural, se realizó una prueba de fricción en dos de los cables parabólicos que típicamente se usaron en todos los vanos de ejecución con autocimbra. Para tal fin se dispusieron dos gatos de tesado, uno en el anclaje pasivo y otro en el anclaje activo, ambos conectados a sus bombas y manómetros analógicos. La prueba fue realizada en el segundo vano ejecutado con la autocimbra. (Vano 22)

Mediante un sistema de cuñas con clip de fijación y un plato de transición, se garantizó que el plato de arrastre del gato pasivo funcionara a manera de anclaje, sin que las cuñas se clavaran en el botón del cable. De esta manera al iniciar a

tesar el costado pasivo, se evidenciaba la presión que se ejercía en el gato ubicado en el costado pasivo. Se llevó registro de presiones y elongaciones cada 1000 psi de presión, llegando hasta la carga final de tesado proyectada.

Posteriormente se retiró el gato del costado pasivo, permitiendo que las cuñas se clavarán, y finalmente se llevó la fuerza del anclaje pasivo a la fuerza de diseño, mediante el mismo gato con que se realizó la prueba. De los resultados obtenidos se constató que los coeficientes de fricción adoptados en el cálculo estructural se ajustaban muy bien a los valores de pérdidas de fricción medidos en campo.

**Tabla 1. Presiones de tesado en prueba de fricción cable CP3**

Anclaje activo		Anclaje pasivo	
Presión	Elongación	Presión	Elongación
PSI	cm	PSI	cm
1000	0.0	400	0.0
2000	5.9	950	-0.1
3000	12.2	1550	-0.2
4000	18.1	2100	-0.2
5000	24.0	2550	-0.3
6000	29.6	3100	-0.4
7000	35.3	3600	-0.5
7500	38.7	3900	-0.5

**Tabla 2. Presiones de tesado en prueba de fricción cable CP4**

Anclaje activo		Anclaje pasivo	
Presión	Elongación	Presión	Elongación
PSI	cm	PSI	cm
1000	0.0	500	0.0
2000	6.8	1100	0.0
3000	12.7	1650	-0.1
4000	19.2	2250	-0.1
5000	24.7	2750	-0.1
6000	30.4	3250	-0.2
7000	36.1	3850	-0.3
7500	39.0	4050	-0.3

A partir de la norma Colombiana de diseño de puentes CCP-14 [1], se establecieron en diseño los siguientes coeficientes de fricción:

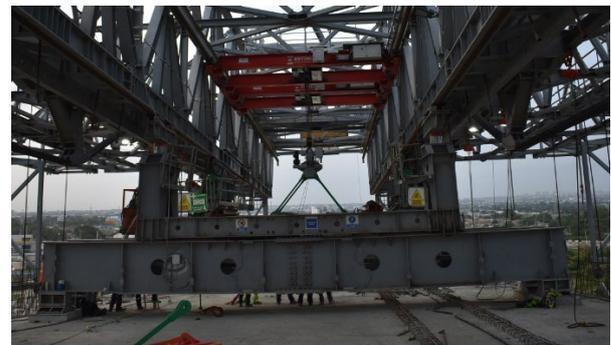
- Coeficiente de fricción por curvatura: 0.21

- Coeficiente de fricción por colocación: 0.00066

### ***Instrumentación en autocimbra.***

Con el fin de controlar las cargas transmitidas por la autocimbra al tablero y a las pilas de los viaductos de acceso, se diseñó un sistema de instrumentación basado en lecturas de extensómetros a cuerda vibrante, soldados a las vigas principales de los binarios de la autocimbra.

Se instrumentaron los binarios de pila, de hormigonado y de lanzamiento, tomando lecturas de deformaciones en los patines superior e inferior en secciones cercanas a los apoyos, las cuales se traducían a reacciones transmitidas por cada uno de los binarios.



**Figura 13. Binario de lanzamiento.**

Estas cargas, de carácter evolutivo y elevado valor, condicionaron el diseño de la sección de tablero, lo cual hacía aún más importante el asegurar que las reacciones transmitidas estuvieran siempre dentro de los valores teóricos esperados.

En la Figura 14 se presenta la disposición en fase de hormigonado para los binarios que apoyan sobre los frentes de fase, y la pila delantera del vano por ejecutar. El binario de hormigonado siempre se apoyaba a 10 metros del eje de la pila trasera del vano a ejecutar. En la Figura 15 se resumen las reacciones en los binarios de hormigonado y de pila, durante la ejecución del viaducto de acceso de la margen izquierda. Los picos más altos superaban en su mayoría las 2500 ton de reacción total transmitida a pila y tablero.

Las reacciones correspondían al peso de la autocimbra, el peso del hormigonado de la sección U y el peso parcial de la losa y sus encofrados, ya que al momento de su vaciado, el concreto de la sección U tenía una resistencia mínima de 35 MPa, parte de los cables eran tesados y parte del peso del concreto fresco de la losa era transmitido directamente a la sección estructural de tablero. El reparto de cargas de vaciado de la sección de losa, de compleja

estimación, fue uno de los aspectos que se logró evaluar con la instrumentación

Las cargas transmitidas, tras el tesado y descimbrado de cada vano y hasta la posición de vano siguiente, se mantenían cercanas a las 1500 toneladas de peso total de la autocimbra y descendían por efecto de la implementación del binario de lanzamiento en cada uno de los avances.

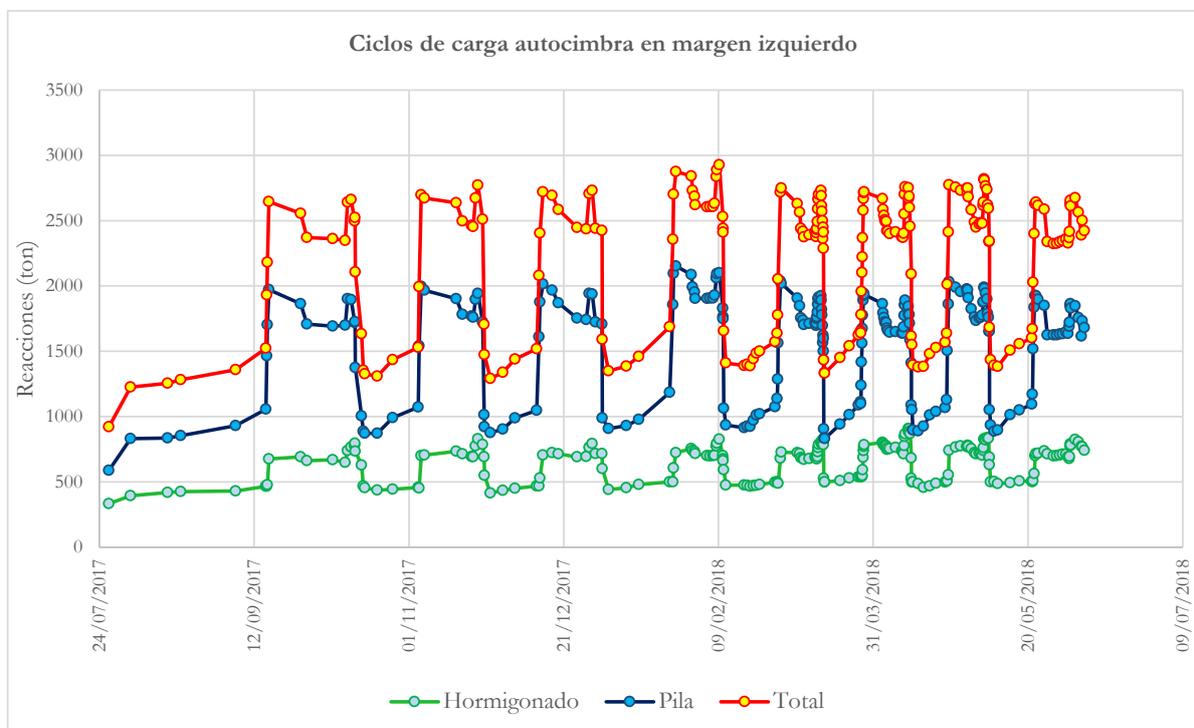
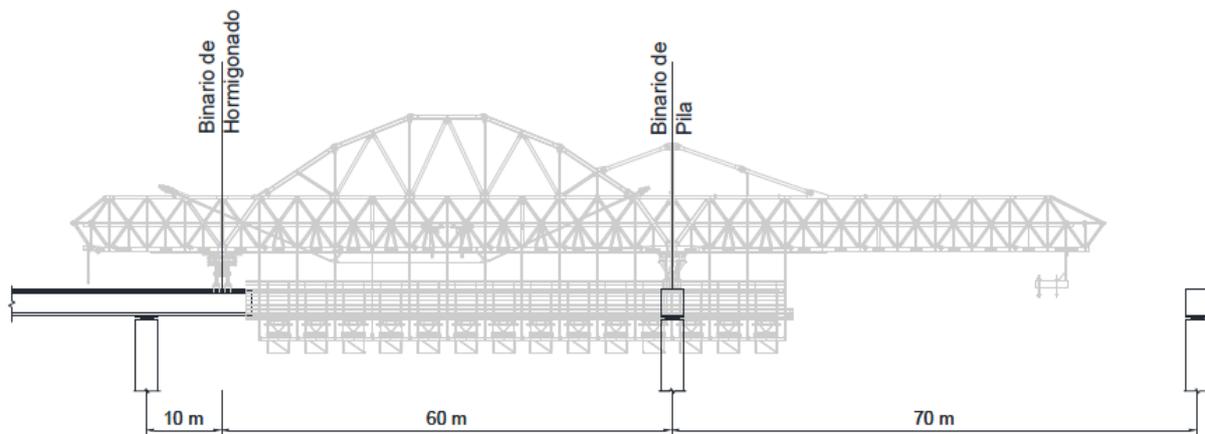


Figura 15. Reacciones totales en binarios de hormigonado y pila de la autocimbra (Viaducto margen izquierdo).

### 3.2 Instrumentación en puntos fijos.

Dada la magnitud de los viaductos de acceso, se requirió del uso de robustas estructuras metálicas de fijación del tablero a uno de los apoyos del puente, durante la fase de ejecución de cada uno de los viaductos de acceso. En la margen izquierda el punto fijo se adaptó en el estribo del lado Barranquilla y en la margen derecha en la pila 3. Una vez se conectaban los viaductos de acceso con el tramo atirantado, se desvinculaban inmediatamente los puntos fijos de los extremos, pasando a ejercer su función, cada uno de los pilonos del tablero atirantado.

Estas estructuras fueron instrumentadas mediante extensómetros a cuerda vibrante, soldados a las diagonales principales de cada punto fijo. Las lecturas se traducían a fuerzas axiales de compresión o tracción y a partir de allí se verificaba el adecuado comportamiento del sistema de fijación de los vanos de acceso.

En la Figura 17 se presentan las reacciones del punto fijo de la margen izquierda durante la

ejecución de los vanos 25 a 21. En la gráfica los valores de axial negativo indican tracción, la cual en general correspondía con el aumento de esfuerzos de retracción tras los vaciados de los vanos y se liberaba, tras el corte de los apoyos provisionales entre dovelas cero y cabeceros de cada frente de ejecución.



Figura 16. Punto fijo en margen derecha.

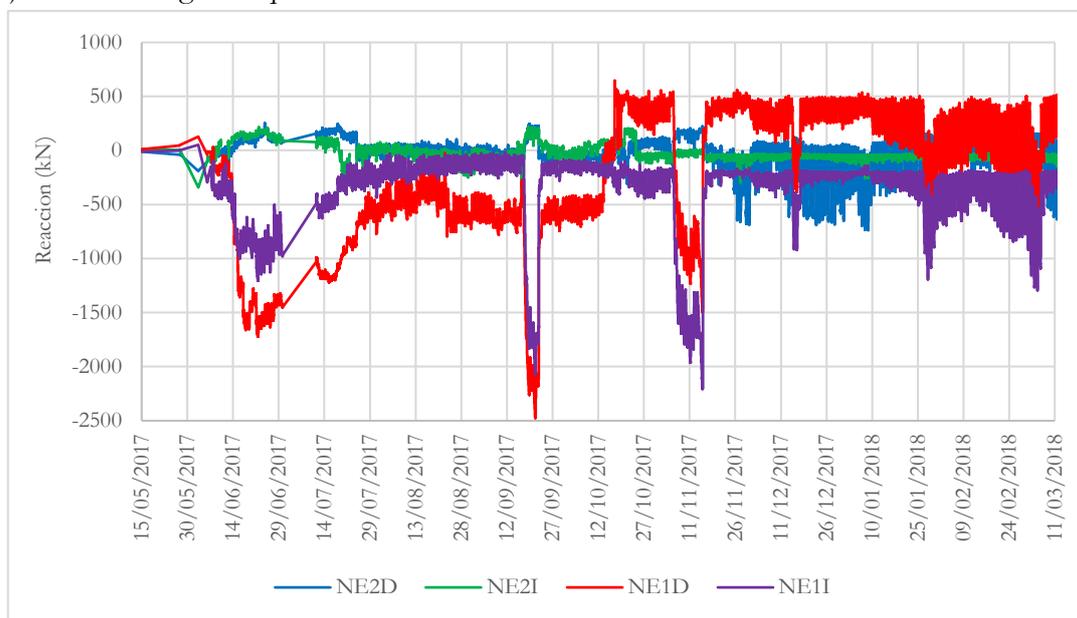


Figura 17. Reacciones en punto fijo margen izquierdo.

### Agradecimientos

Durante la ejecución del nuevo Puente Pumarejo, fueron cientos de personas y empresas las que intervinieron en un sinnúmero

de actividades que se ejecutaron desde sus etapas de pilotaje, a las cuales se debe la culminación de

este singular proyecto que enmarca la ingeniería de puentes en Colombia.

En particular, se resalta el trabajo y apoyo de las empresas BERD y ConstruGomes de Portugal, quienes realizaron el diseño y construcción de los medios auxiliares para la ejecución de los viaductos de acceso (Carros de alas y autocimbra MSS-70).

### ***Referencias***

- [1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14, Ministerio de transporte, Colombia, 2014.