

Validación de diseños de cimentación profunda mediante ensayos de carga en pilotes: caso de aplicación en el Puente sobre el Lago San Roque, Córdoba, Argentina

Covassi, Pedro A.^a; Zeballos, Marcelo E.^a; Gerbaudo, Guillermo M.^b; Gerbaudo, Carlos F.^b

^aZCI Consultores de Ingeniería, pacovassi@gmail.com, zeballos.ingenieria@gmail.com

^bIngroup S.R.L., ingroup@ingroup-op.com.ar

Palabras clave: cimentación profunda, pilotes, ensayo de carga, validación geotécnica, puentes.

RESUMEN

El diseño de cimentaciones para puentes requiere un conocimiento detallado de las condiciones geotécnicas del sitio. Para la mejora en la interpretación de la interacción suelo – cimentación los ensayos de carga en pilotes constituyen una herramienta fundamental. Este trabajo presenta el proceso de validación del diseño de cimentación profunda del puente sobre el lago San Roque, Córdoba, Argentina. En las etapas de diseño (anteproyecto y proyecto ejecutivo) se realizaron dos campañas geotécnicas que dieron lugar a la definición de la solución de cimentación. Para validar aspectos vinculados a la solución constructiva y estructural se realizaron dos ensayos de carga en pilotes, a escala, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la interacción pilote-suelo, verificar las estimaciones de resistencia adoptadas y ajustar la secuencia constructiva prevista. Se presentan las condiciones geotécnicas del sitio, la metodología de ensayo y los principales resultados, destacando la utilidad de este enfoque para reducir la incertidumbre geotécnica en proyectos de infraestructura vial de envergadura.

ABSTRACT

Bridge foundation design requires detailed knowledge of the site's geotechnical conditions. Pile load tests constitute a fundamental tool for improving the interpretation of soil interaction.. This paper presents the validation process for the deep foundation design of the San Roque Lake Bridge, Córdoba, Argentina. During the design stages (preliminary design and detailed design), two geotechnical campaigns were conducted, leading to the definition of the foundation solution. To validate aspects related to the construction and structural solution, two scaled pile load tests were conducted with the aim of evaluating pile-soil interaction, verifying the assumed resistance estimates, and adjusting the planned construction sequence.. The site's geotechnical conditions, testing methodology, and main results are presented, highlighting the value of this approach in reducing geotechnical uncertainty in large-scale road infrastructure projects.

INTRODUCCIÓN

El diseño de las cimentaciones de puentes constituye una de los componentes críticos en el desarrollo de proyectos de infraestructura vial. La capacidad de carga de un pilote y su comportamiento frente a las solicitaciones dependen de manera directa de las condiciones geotécnicas del sitio, las cuales no siempre pueden caracterizarse con el nivel de certeza necesario a partir de las campañas de reconocimiento convencionales. En estos contextos, los ensayos de carga en pilotes, en dimensiones de diseño o a escala, representan una herramienta de gran valor: permiten evaluar la interacción real entre el pilote y el suelo, verificar las hipótesis de diseño adoptadas y ajustar la secuencia constructiva antes de extenderla a la totalidad de la obra.

Las normas de diseño de uso frecuente (AASTHO, 2024; Eurocódigo 7, 2004), indican que la ejecución de ensayos in situ para la caracterización del comportamiento de pilotes derivan en diversas acciones sobre la cimentación proyectada.

Si los ensayos se realizan durante la etapa de diseño, sus resultados son empleados para validar las hipótesis de comportamiento, incrementando la certeza del conocimiento geotécnico y permitiendo la adopción de factores de minoración de la resistencia superiores a los empleados sin estos ensayos. Cuando se ejecutan la cantidad adecuada de ensayos (definida según la tipología de cimentación y los ambientes geotécnicos afectados), es posible incrementar los factores de minoración de resistencia en el orden de un 40% a 50% respecto de los originalmente empleados. Durante esta etapa de diseño, los resultados de los ensayos pueden ser empleados como un reconocimiento adicional del terreno y su interacción con la estructura. Los parámetros geotécnicos, resistentes y deformacionales, derivados de estos ensayos pueden generar información de mayor nivel de confiabilidad respecto de la obtenida con las campañas geotécnicas convencionales.

Cuando los ensayos son realizados ya con el proceso de construcción iniciado, sus resultados tienen aplicaciones algo más limitadas. En tal caso, opera como ensayo de validación de los criterios y modelos utilizados en el diseño, y como sistema de ajuste de aspectos constructivos. En esta etapa del proceso, el ensayo puede emplearse como parte de procesos de ajuste de diseño, con conceptos similares a los propuestos en el Método Observacional, tan aplicado en la geotecnia, permitiendo verificar lo ya realizado, y generando herramientas para optimizar los componentes de obra pendientes de ejecución.

En todos los casos es necesario recordar que la ejecución de los ensayos de carga en pilotes demandará esfuerzos de realización superiores a los que demandan otros procesos de reconocimiento geotécnico convencional, por lo que su definición debe ser estudiada detalladamente para obtener los resultados más representativos

posibles.

El puente sobre el Río Cosquín en la Autovía RN N°38, ubicado en el extremo norte del lago San Roque, en la provincia de Córdoba, Argentina, constituye un caso representativo de esta problemática. En la Figura 1 se muestra la ubicación general del puente sobre el Río Cosquín. En la Figura 2 se presenta una imagen del puente.

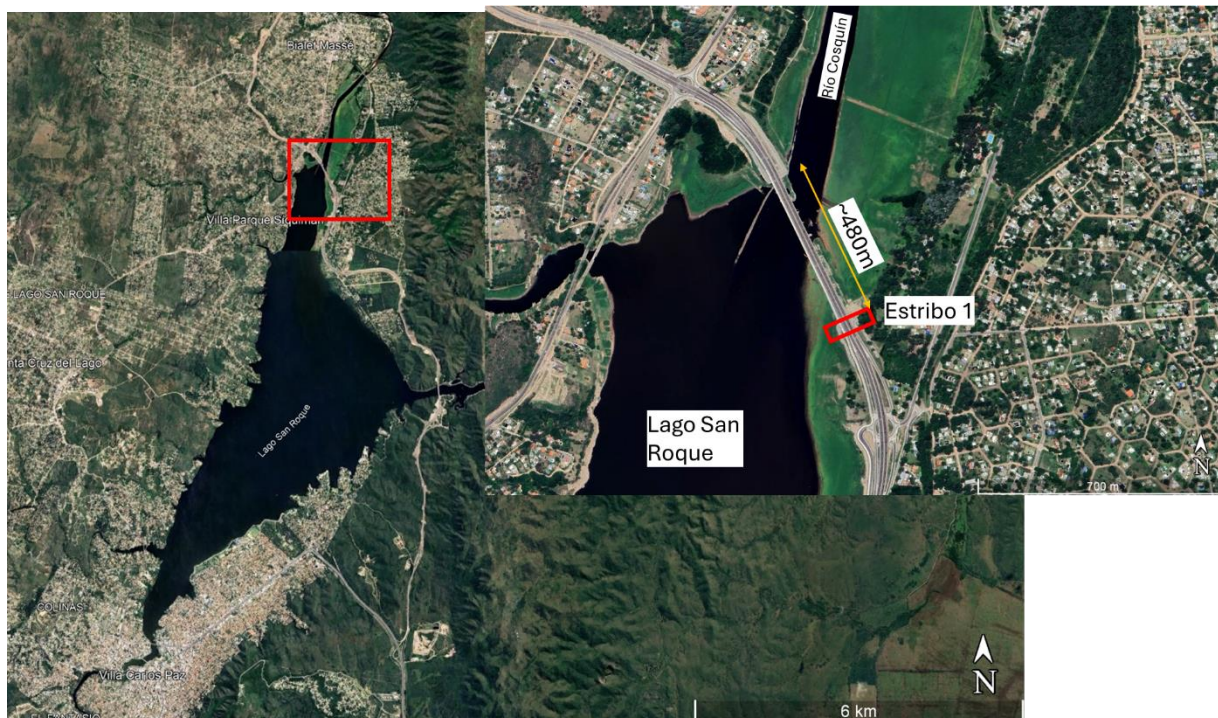


Figura 1. Ubicación del Puente sobre el Río Cosquín y del Estribo 1



Figura 2. Imagen del proyecto del puente

Organiza:

La estructura tiene una longitud total de 480 m, y está formada por 12 tramos de 40 m de longitud cada uno de ellos, con un ancho total del tablero de 28,2 m para contener cuatro calzadas, banquetas internas y externas, una vereda con ciclovía de 3,4 m de ancho útil, defensas vehiculares y barandas metálicas peatonales. El tablero está constituido por múltiples vigas pretensadas de sección “U”, con una losa superior formada por prelosas premoldeadas con una capa de compresión de segunda etapa. Los estribos del puente son del tipo cerrado, con una estructura compuesta de muros frontales y laterales, contrafuertes, vigas de coronamiento, y una losa de fundación con cimentación de pilotes. Las pilas son tipo pórtico transversal, constituidas por columnas y una viga dintel superior que sirve de apoyo a las vigas del tablero, con fundación de pilotes. En la *Figura 3* se observa una sección transversal típica del puente sobre el Río Cosquín.

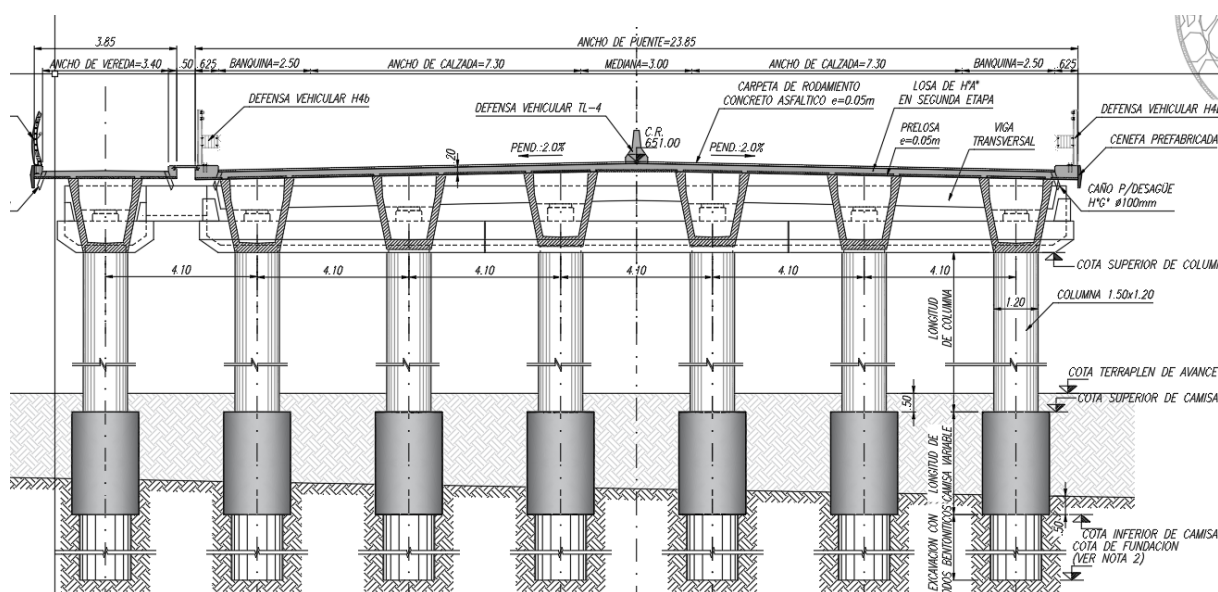


Figura 3. Esquema de la sección transversal típica del Puente sobre el Río Cosquín

Durante los períodos de lluvias, la totalidad de la extensión del puente se encuentra afectada por el nivel de embalse, por lo que la totalidad de sus apoyos está sumergida. En la *Figura 4* se presenta una imagen del puente sobre el lago en construcción.

El método constructivo consiste en el montaje de vigas y prelosas con una viga de lanzamiento metálica auto deslizante, que permitió realizar la construcción sobre el lago utilizando el propio tablero como plataforma de trabajo.

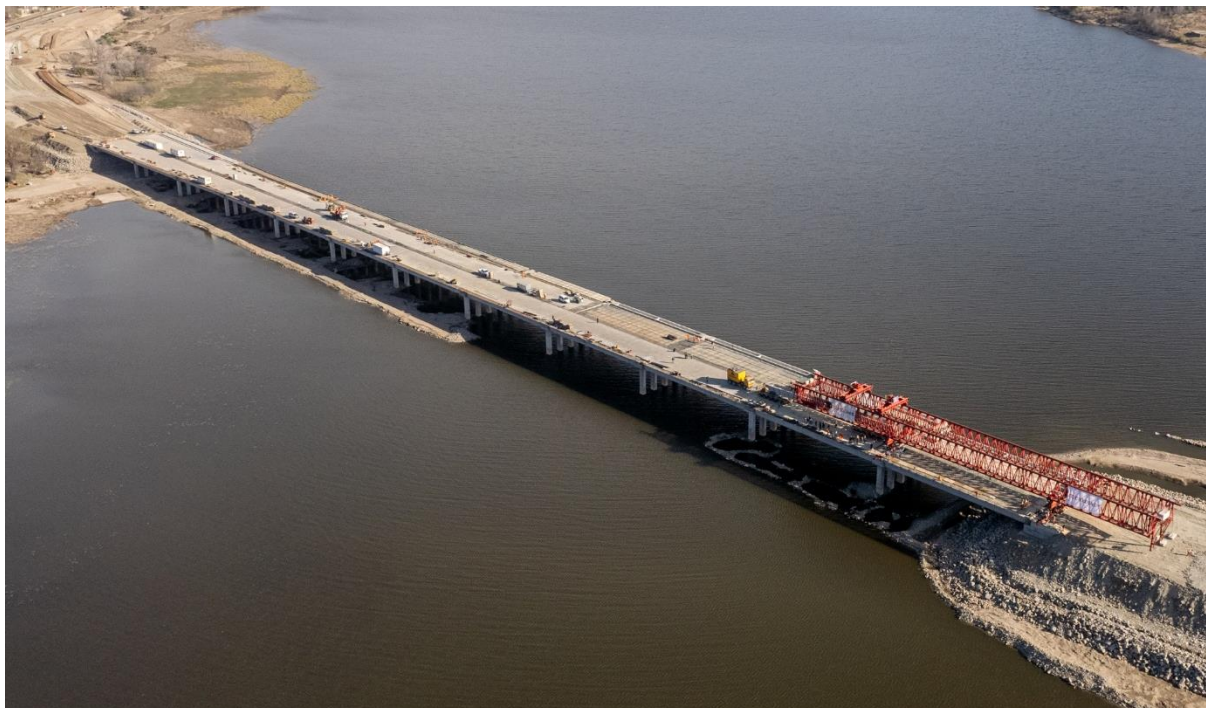


Figura 4. Imagen del Puente sobre el Río Cosquín en construcción

El principal condicionante de proyecto fueron las fundaciones con pilotes en el lecho del lago, por lo que en la etapa de diseño se adoptó un sistema estructural de tableros vinculados por losas de continuidad que permitió garantizar la estabilidad longitudinal del puente penetrando el pilote en un estrato granular de arenas y gravas muy compactas.

Como parte de la caracterización del emplazamiento se realizaron dos campañas de reconocimiento geotécnico (durante las etapas de anteproyecto y proyecto ejecutivo) Luego de estos procesos, se consideró recomendable validar algunos aspectos vinculados a la solución constructiva y el comportamiento estructural, a fin de mejorar la certeza de diseño, previo a la implementación directa a la totalidad de la estructura. Esta situación motivó la realización de dos ensayos de carga estática en pilotes de prueba, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la interacción pilote-suelo, verificar las estimaciones de resistencia adoptadas y definir recomendaciones constructivas para la continuidad de los trabajos.

En el presente trabajo se describen las condiciones geotécnicas del sitio, la metodología de ensayo empleada y los principales resultados obtenidos, destacando la utilidad de este enfoque para la reducción de la incertidumbre geotécnica en proyectos de infraestructura de envergadura.

CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO

La caracterización geotécnica del sitio de emplazamiento del puente se desarrolló a partir de dos campañas de reconocimiento ejecutadas por la consultora (Abyaterra, 2020, 2021). Una primera campaña asociada a la etapa de anteproyecto, orientada a la caracterización y parametrización general del emplazamiento, y una segunda campaña vinculada al proyecto ejecutivo, que amplió el reconocimiento mediante sondeos adicionales y ensayos de campo y laboratorio.

En el emplazamiento del puente se ejecutaron sondeos exploratorios, lo que permitió definir el perfil geológico-geotécnico. En la margen Este, donde se ubica el Estribo 1 (sector en el que posteriormente se realizaron los ensayos de carga descritos en este trabajo), el perfil quedó conformado por tres estratos indicados en la Tabla 1:

Tabla 1: Perfil de suelos y propiedades geotécnicas de los estratos.

Estrato	Profundidad [m]	Descripción	N _{SPT} promedio	Dr	c' [kPa]	φ' [°]
1	0 – 5	Limo arcilloso (CL-ML/CL/ML), de baja resistencia.	3	<10	10 - 15	10 - 12
2	5 – 7	Grava arenosa con rodados, de compacidad media.	30	65	0	33 - 35
3	7 - 15	Grava arenosa de compacidad alta	>50	>80	5 – 8	38 - 40

Para la modelación de la interacción suelo-estructura en condiciones de servicio, se determinaron además módulos de reacción horizontal (módulos de balasto) crecientes con la profundidad, desde valores del orden de 1 MN/m³ en suelos secos superficiales hasta superar los 275 MN/m³ en los estratos de grava compacta a 12 m de profundidad, información de utilidad para los modelos de interacción lateral pilote-suelo bajo cargas horizontales y sísmicas.

Los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras del sitio indicaron,

asimismo, que los suelos no resultan agresivos para las estructuras de hormigón (según Norma VN-E18-89 de Vialidad Nacional), no habiéndose observado floculación tras 24 horas de reposo, lo cual es indicativo de un contenido de sales inferior al 0,1%. Esta caracterización —particularmente la presencia de un estrato somero de baja resistencia (limos arcillosos) seguido de un manto de gravas de compacidad creciente con la profundidad— constituyó el marco de referencia geotécnico a partir del cual se definieron las hipótesis de diseño de la cimentación profunda, hipótesis cuya validación mediante ensayos de carga a escala real se desarrolla en las secciones siguientes.

OBJETIVO Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

Un aspecto particular del perfil geotécnico en el sector del Estribo 1 es la presencia del Estrato 2, conformado por gravas arenosas con rodados de compacidad media. Si bien este estrato presenta condiciones mecánicas relativamente competentes, la existencia de rodados de tamaño variable introdujo la valoración de potenciales dificultades en la ejecución de los pilotes, pudiendo provocar desvíos, pérdidas de verticalidad o interrupciones en el proceso de perforación. Esta circunstancia generó la necesidad de valorar la posibilidad de fijación de la cota de apoyo de algunos pilotes en el Estrato 2, en lugar de alcanzar el Estrato 3 de gravas compactas previsto en el diseño, con la consecuente incertidumbre respecto de la capacidad de carga efectiva de dichos elementos.

Esta hipótesis de trabajo motivó la decisión de realizar ensayos de carga sobre dos pilotes de prueba con longitudes diferentes: uno de ellos diseñado para apoyar en el Estrato 2 —representando el escenario menos favorable— y otro de mayor longitud, con empotramiento en el Estrato 3. Los ensayos tenían así un doble propósito: por un lado, verificar las hipótesis de capacidad de carga adoptadas en diseño para los pilotes con apoyo en el estrato profundo; por otro, evaluar de manera concluyente si el apoyo en el Estrato 2 constituía una alternativa técnicamente viable. En caso de obtenerse resultados desfavorables para el pilote más corto la posibilidad de aceptar pilotes apoyados en dicho estrato quedaría descartada, y las recomendaciones constructivas deberían orientarse a garantizar en todos los casos el empotramiento en el Estrato 3. Los ensayos de carga estática se realizaron sobre dos pilotes de prueba ubicados en el sector del Estribo 1 del puente, ejecutados con anterioridad al inicio de los trabajos de cimentación en la totalidad del puente. La disposición en planta de los pilotes de ensayo se presenta en la Figura 5. Los pilotes de ensayo se denominaron PE1 y PE2, respectivamente. Los mismos fueron preexcavados y hormigonados in situ en las mismas condiciones que los pilotes de producción del estribo. Dada la reducida longitud de los pilotes y la condición de emplear los pilotes de producción como

elementos de reacción, los pilotes de ensayo fueron diseñado con un diámetro reducido, a fin de poder llevarlos a condiciones de rotura.

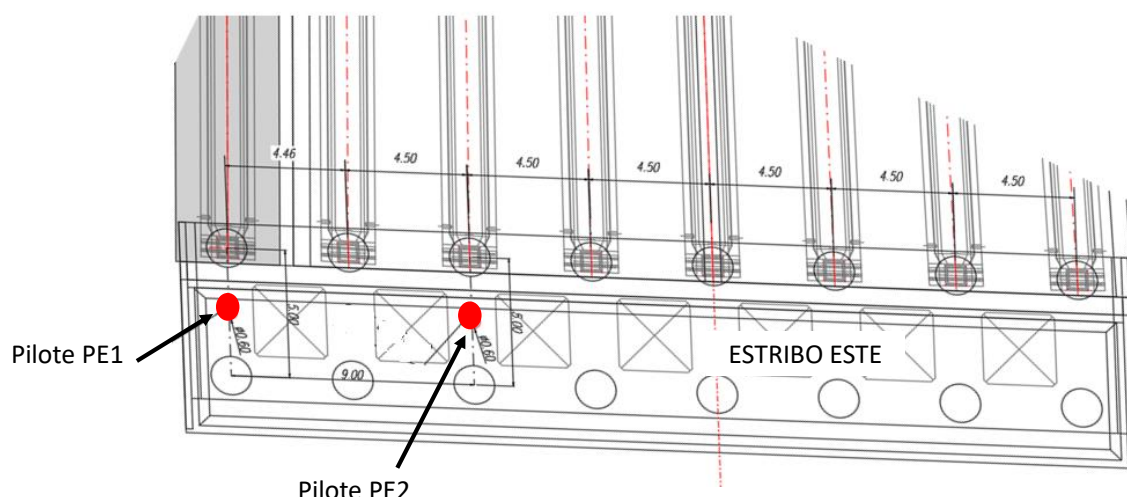


Figura 5. Esquema de ubicación en planta de los pilotes de ensayo dentro de la estructura del Estribo 1

Para la ejecución se utilizó un brocal o camisa perdida en los primeros 3 m, resultando una sección 0,60 m de diámetro. Por debajo de los 3 m, se continuó la perforación con un diámetro de 0,50 m hasta la base de los pilotes. El pilote PE1 resultó con una longitud total de 7,50 m con una penetración en el Estrato 3 del orden de los 0,90 m, coincidiendo la cota de fundación con los pilotes de producción del estribo (Figura 6). En cambio, el pilote PE2 resultó con una longitud total de 6,50 m, con la punta apoyada en el Estrato 2 (Figura 7).

Se dispuso de un sistema de viga de reacción de hormigón armado contra la cual actúa el gato hidráulico que genera la carga aplicada sobre el pilote de prueba. La viga de reacción se encontraba vinculada a dos pilotes del sistema de cimentación del estribo del propio puente, los cuales generaban la fuerza de soporte de la solicitación, a través de su propio peso y la resistencia a través del fuste. El control de desplazamientos se realizó mediante puntos de medición distribuidos en la cabeza del pilote. Para evitar la influencia de los desplazamientos locales, el sistema de medición fue referenciado a una estructura de vigas metálicas con puntos de apoyo alejados varios diámetros del elemento ensayado.

En ambos pilotes se previó la aplicación de dos ciclos de carga. El ciclo inicial, destinado al acomodamiento general del pilote, tenía como objetivo alcanzar una carga máxima de 800 kN. Posteriormente se descargó hasta 200 kN para iniciar un segundo ciclo con una carga máxima de 1150 kN. El valor máximo de carga aplicada se definió en función de las dimensiones del pilote ensayado, a fin de posibilitar que

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Curvas carga – desplazamiento

El ensayo sobre el pilote PE1 se desarrolló satisfactoriamente a través de los dos ciclos de carga previstos. En el primer ciclo se alcanzaron 800 kN con desplazamientos estables, y en el segundo se llegó a 1150 kN. El procesamiento de las lecturas de asentamientos permitió construir una curva carga-desplazamiento representativa del comportamiento global del pilote (Figura 8).

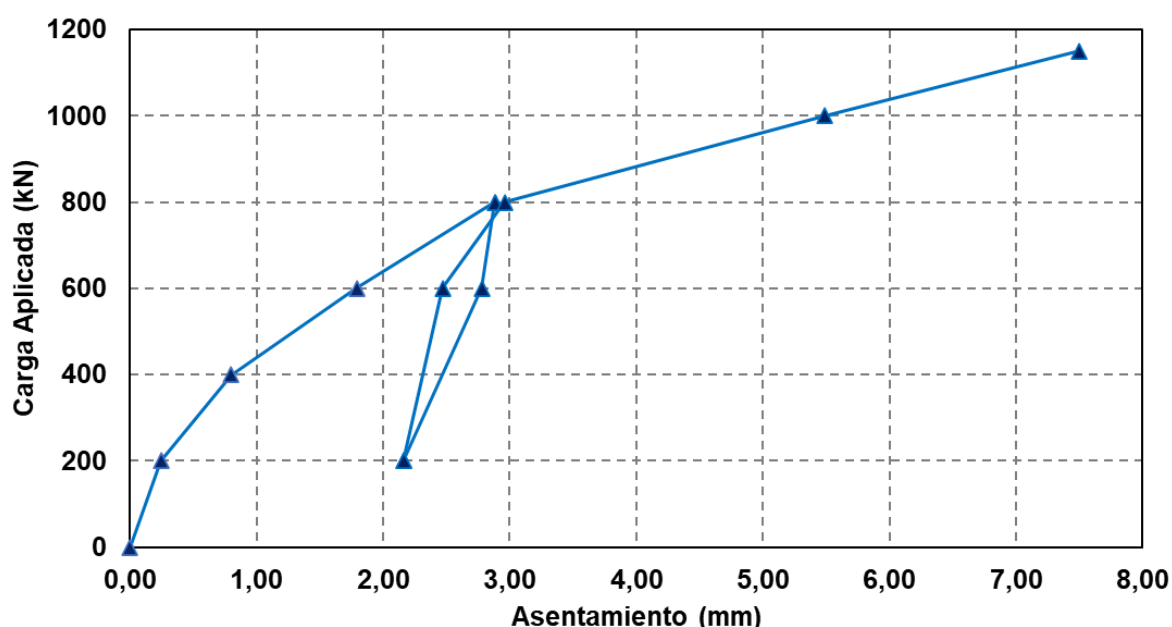


Figura 8. Curva carga-desplazamiento del pilote de ensayo PE1

El ensayo sobre el pilote PE2 mostró un comportamiento satisfactorio con bajas cargas, del orden de los 200 kN, con los desplazamientos medidos de entre 2,7 mm y 3,6 mm. Los incrementos posteriores de carga mostraron desplazamientos excesivos, los cuales son consistentes con la interpretación de un estado de agotamiento de la resistencia por fuste de este pilote. Dado que el único estrato activo en la generación de resistencia por fuste era el Estrato 2, manto de arenas con gravas, se estimó una resistencia unitaria de corte en el fuste comprendida entre 50 y 60 kPa. Este valor sirvió de referencia para la interpretación del ensayo sobre el pilote PE1.

Modelación del comportamiento de los pilotes

Para la simulación del comportamiento de los pilotes se ha empleado un modelo de transferencia de cargas clásico. El pilote transfiere la carga al terreno a través de dos componentes: el contacto del fuste con el terreno y el contacto de la punta del pilote

con el terreno. El modelo discretiza el pilote en 20 elementos (Zeballos *et al.*, 2023). En cada uno de los elementos se establece la condición de equilibrio sobre la base de los componentes de peso propio, junto con las reacciones que provienen de los elementos contiguos y los esfuerzos que el elemento le transfiere al terreno según su requerimiento de asentamiento para alcanzar la condición de equilibrio. La Figura 9 muestra la situación de equilibrio de fuerzas en el elemento “i” del conjunto secciones que conforman el pilote.

Las ecuaciones de transferencia generadas para el contacto lateral del pilote con el terreno están definidas como un modelo de tipo bilineal en el cual la condición de rotura, o inicio del comportamiento plástico, se fija para un desplazamiento del orden de entre 5 mm, el cual implica un 1 % del diámetro del pilote.

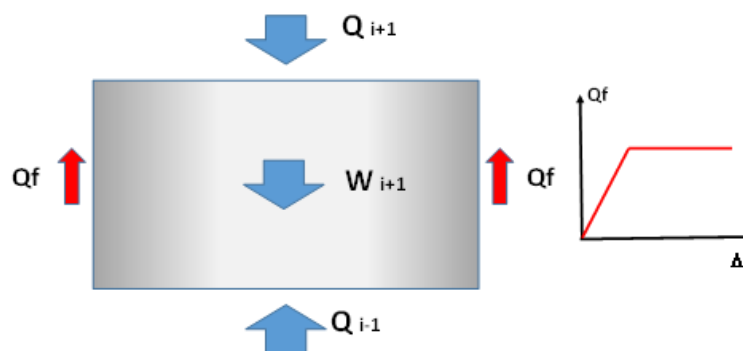


Figura 9. Esquema de equilibrio de elemento i de pilote. La transferencia de carga por el fuste se aplica según una ecuación bilineal.

En la punta del pilote se ha empleado una relación tensión deformación siguiendo un modelo hiperbólico de uso clásico en la geotecnia (Kondner, 1963 y Duncan y Chang, 1970). La misma expresa la relación entre la presión de punta (q_p) actuante para un desplazamiento (Δp) de la forma indicada en (1)

$$q_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{E_i} + \frac{\Delta p \cdot R_f}{q_{p,ult}}} \quad (1)$$

Donde: E_i es el módulo de deformación inicial de la curva carga desplazamiento del suelo, para estas simulaciones se considera que el valor es del orden de 2 a 5 veces superior al módulo de deformación en condición de rotura del suelo (O'Neill y Reese, 1999); $q_{p,ult}$ es la resistencia en la punta evaluada según procedimientos clásicos (Meyerhoff, Brinch-Hansen, Vesic, etc.) de definición de este parámetro para el diseño de cimentaciones con pilotes, puede emplearse definiciones en función de los parámetros resistentes del terreno de apoyo (es decir cohesión, c , y ángulo de fricción,

ϕ , o pueden establecerse a partir de expresiones empíricas), y R_f , coeficiente de relación entre la condición de falla y el estado de rotura calculado.

El proceso de cálculo se inicia asumiendo un desplazamiento en la punta del pilote y propagando su efecto hacia arriba, elemento por elemento, hasta llegar a la cabeza (O'Neill y Reese, 1999). Si la carga resultante en la cabeza no coincide con la carga aplicada, se itera el desplazamiento inicial en la punta hasta lograr la convergencia. Aplicando este procedimiento a una secuencia de cargas de referencia se construye la curva carga-desplazamiento modelada, la cual se compara con la obtenida experimentalmente en el ensayo de campo.

Resultados de la modelación para los pilotes de ensayo

Para la construcción de la curva de calibración de los pilotes de ensayo se han considerado los siguientes aspectos en base a los resultados de los ensayos:

- La componente de resistencia al corte en el fuste, en su condición de estado de rotura, es del orden de 60 kPa, y resulta aplicable a los niveles de arenas y gravas. Este valor fue determinado a partir del resultado del ensayo sobre el pilote PE2. No se considera contribución de resistencia en el fuste en el sector afectado por los limos arcillosos superiores.
- La resistencia en la punta del pilote fue establecida a partir del análisis de los resultados obtenidos en el propio ensayo, en particular en el tramo recto de la curva carga desplazamiento, para el rango comprendido entre los 3 y 6 mm de asentamiento.
- Aplicando el procedimiento antes indicado, se generó la curva carga-asentamiento para el pilote de ensayo PE1. El modelo calibrado muestra un ajuste satisfactorio respecto de los datos experimentales y se presenta en la Figura 10. En dicha figura se presentan las curvas carga-asentamiento obtenidas para el fuste y la punta, respectivamente. El modelo conformado, tiene una tendencia conservadora en la definición de los asentamientos, ya que, como se observa, son ligeramente mayores a los medidos. Esta definición se adoptó para permitir que las predicciones tengan un margen de seguridad adicional al extender los resultados a los pilotes definitivos de la obra.
- A partir de esto, se estimó la carga total de rotura (Q_u) del pilote es del orden de 2150 kN, para la cual le corresponde una presión de rotura en la punta del pilote del orden de 9900 kPa, valor que fue considerado como referencia para la conformación del modelo de transferencia de carga entre el pilote y el terreno. En base a ello, se determinó la curva para la representación de la presión de contacto en la punta del pilote es la indicada en la Figura 11.

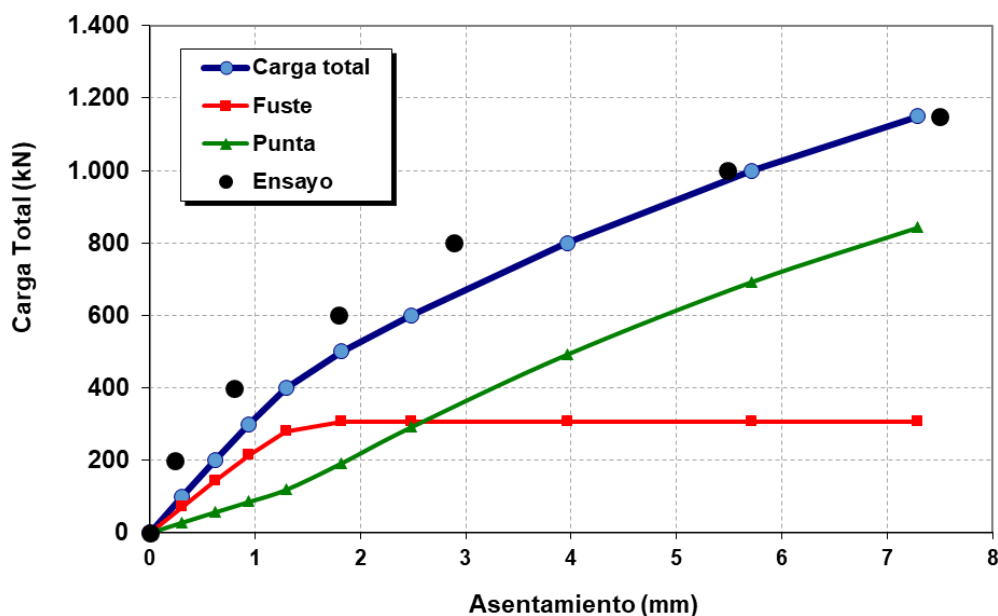


Figura 10. Curva carga – asentamiento en el pilote de ensayo PE1.

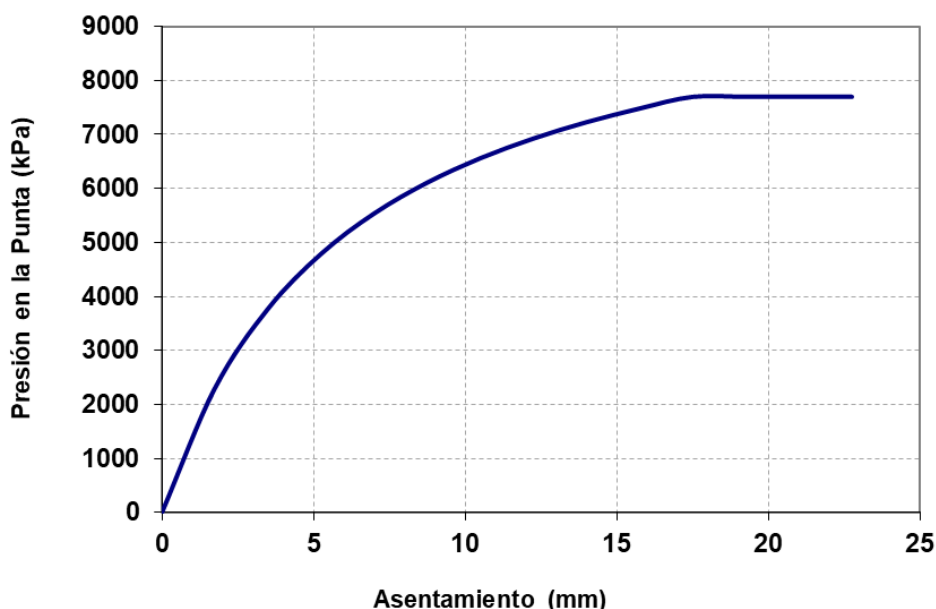


Figura 11. Curva presión – asentamiento en la punta del pilote de ensayo.

Un aspecto relevante que emerge de la modelación es la marcada predominancia de la resistencia por punta. Para el pilote de prueba, la resistencia última del fuste representó apenas el 25% de la resistencia total, y el comportamiento carga-deformación quedó controlado por el fuste únicamente para asentamientos menores

a 1,7 mm. A partir de ese umbral, la curva adquiere un tramo aproximadamente lineal cuya pendiente está gobernada por la respuesta de la punta, dado que la resistencia del fuste ya se encuentra plenamente movilizada.

Aplicación a los pilotes de la obra

Los parámetros geotécnicos obtenidos del ensayo y su modelación se aplicaron para simular el comportamiento de los pilotes definitivos, tanto en estribos como en pilas. En la Figura 12 y Figura 13 se muestran las relaciones de carga-asentamiento para los pilotes del estribo y pilotes de pilas, respectivamente.

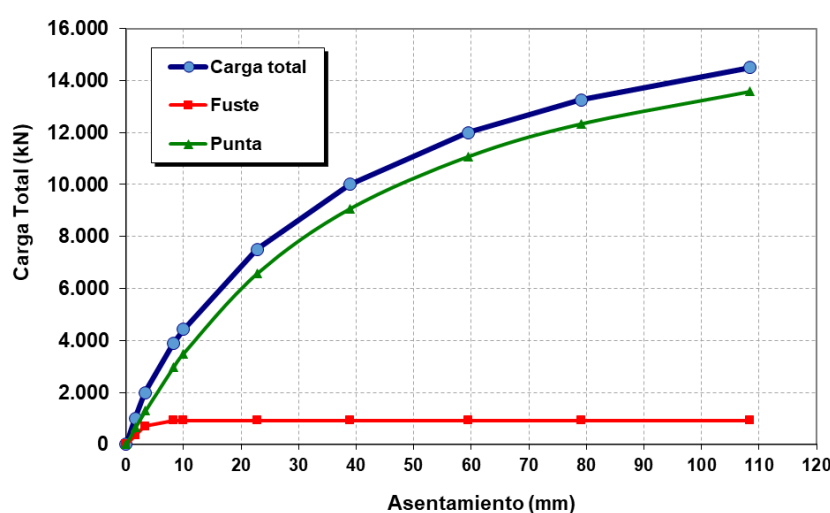


Figura 12. Curva carga desplazamiento pilote de estribo. Diámetro 1,50 m. Longitud 7,50 m.

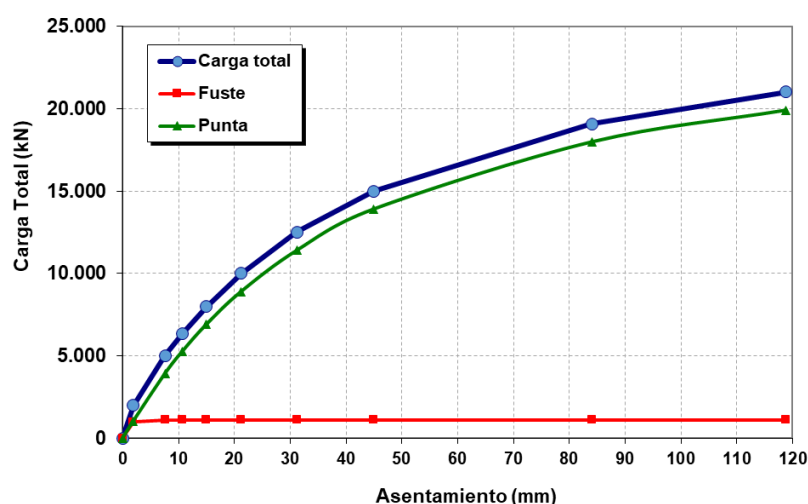


Figura 13. Curva carga desplazamiento pilote de estribo. Diámetro 1,80 m. Longitud 7,50 m.

Los resultados obtenidos permiten formular las siguientes observaciones:

- La aplicación de los modelos carga desplazamiento en los pilotes efectivamente componentes de la obra validan su comportamiento como pilotes con transferencia de carga predominantemente por la punta.
- Por las dimensiones de los pilotes de obra y su relación área de fuste/área de punta, se observa que la resistencia última del fuste representa un 5% de la resistencia total última, por lo que se considera que el comportamiento carga-deformación está controlado por la respuesta de la punta.
- Para las cargas normales estimadas (estado de servicio) el aporte del fuste representa un 25% y 22% de la carga total en el caso de los pilotes del estribo y las pilas, respectivamente, siendo que para los desplazamientos estimados la componente resistente del fuste se ha desarrollado por completo.
- A partir de los resultados obtenidos para la carga total última, se estimó que los factores de seguridad globales respecto a las solicitaciones estructurales en condiciones normales superan el orden de 3 a 4.

CONCLUSIONES

Los ensayos de carga realizados sobre los pilotes de prueba permitieron validar y ajustar el diseño de cimentación profunda del puente sobre el lago San Roque, aportando información que las campañas de reconocimiento geotécnico previas no habían podido establecer con suficiente certeza. Entre los aspectos más relevantes se destacan:

- El comportamiento carga-deformación de los pilotes está controlado predominantemente por la respuesta de la punta, con una contribución del fuste que, si bien se moviliza de manera temprana, representa una fracción menor de la capacidad total.
- Se verificó que un adecuado empotramiento de la punta en el manto de gravas compactas —no inferior a 1 metro— es condición necesaria para garantizar la capacidad de carga prevista en diseño.
- Bajo las cargas de servicio estimadas, los asentamientos individuales de los pilotes se encuentran en el rango de 7 a 10 mm, valor compatible con los requerimientos de la estructura.
- El modelo de transferencia de carga empleado, con una formulación bilineal para el fuste y una relación hiperbólica para la punta, demostró ser una herramienta adecuada para la calibración e interpretación de los resultados experimentales, con una respuesta conservadora que otorga confiabilidad a las predicciones realizadas sobre los pilotes definitivos.

El caso presentado ilustra el valor de los ensayos de carga como herramienta de validación en proyectos donde la incertidumbre geotécnica no puede resolverse únicamente mediante reconocimiento de suelos, y refuerza la conveniencia de incorporarlos en la etapa previa a la ejecución de las cimentaciones definitivas.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores de esta publicación agradecen la posibilidad de su realización a las autoridades de la concesionaria vial Caminos de las Sierras S.A. y la empresa Constructora J.J. Chediack.

REFERENCIAS.

AASHTO (2024). LFRD Bridge Design Specifications. 10th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials. ISBN: 978-1-56051-738-2.

Duncan, J. M. y Chang, C.-Y (1970). "Non linear analysis of stress and strain in soils" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No. SM5, 1629–1653.

EN 1990 (2002) Eurocode: Basis of structural design. ICS 91.010.30. Ref. code: EN 1990:2002+A1.

EN 1997-1 (2004). Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1 to 3. European standard codes. ICS 91.060.01; 91.120.20. Ref code: EN 1997-2004.

Kondner, R.L y Zelasko, J.S. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation for sands. Proc. 2nd Pan-american Conf. on Soil Mechanics and Foundations Eng., Brazil, Vol. 1, 1963, pp. 289-324.

O'Neill, M. W. y Reese, L. C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025.

Zeballos, M.E., Covassi, P.A. y Skorepa, A. (2023). Variación en el Comportamiento de Pilotes según Condiciones de Diseño y Efectivas de Operación. Memorias del XXVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Comodoro Rivadavia 2023.