



# Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos

## Post grouted drilled shafts: case studies

Useche, Danny J. <sup>2</sup> - Aiassa, Gonzalo M. <sup>1,3</sup>  - Arrua, Pedro A. <sup>1</sup> - Eberhardt, Marcelo G. <sup>1</sup>

Recibido: 22 de febrero de 2022 • Aceptado: 07 de septiembre de 2022

### Resumen

*En este artículo se presenta una revisión de antecedentes sobre pilotes perforados con inyección de lechada en la punta. Se analiza el efecto de la lechada en el comportamiento del pilote, así como los métodos constructivos y diferentes dispositivos para llevar a cabo esta técnica. Se eligieron seis estudios de caso reportados en la literatura técnica, los cuales cuentan con amplia información sobre el desempeño de este tipo de fundaciones. Los estudios consultados mostraron que, al realizar la inyección de carga en la punta del pilote, se incrementa significativamente la capacidad de carga por punta y por fricción de la fundación. Además, la lechada aumenta la rigidez del suelo y disminuye los asentamientos en el pilote, siendo una solución muy apropiada para fundaciones profundas.*

**Palabras clave:** Lechada cementicia, pilotes perforados, celda de precarga.

### Abstract

*This paper presents a literature review on post-grouted drilled shafts. The effect of the grout on the behavior of the pile is analyzed, as well as the construction methods and different devices to performance this technique. Six case histories reported in the literature were chosen, which have extensive information on the performance of this type of foundation. The studies consulted showed that, when carrying out the load injection at the tip of the pile, the tip bearing capacity and the lateral friction of the pile are significantly increased. In addition, the grout increases the stiffness of the soil and reduces the settlements of the pile, being a very appropriate solution for deep foundations.*

**Keywords:** Grouting, drilled shafts, pre-load cell.

1. UTN Facultad Regional Córdoba. Dpto. de Ingeniería Civil. CIGEF. Ciudad Universitaria, Córdoba (5000), Argentina.

2. Becario posdoctoral CONICET. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia

 gaiassa@frc.utn.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

La inyección de productos fluidos a presión es una antigua tecnología de mejoramiento de suelo. La inyección de cemento y agua en el suelo, a presión controlada, incrementa la resistencia y reduce la compresibilidad. En el diseño de la técnica se establecen las etapas, secuencia, volumen y presión de aplicación. El efecto de mejoramiento por la inyección a presión se compone de (i) compactación o desplazamiento del suelo y (ii) penetración o infiltración de la mezcla en el suelo. La componente de aporte en la mejora por desplazamiento e infiltración dependen de la granulometría y la estructura del suelo. Los recursos necesarios para ejecutar la técnica son (Figura 1): (i) materiales: cemento y agua, (ii) mezclador, (iii) agitador, (iv) bomba de inyección, (v) lanza de inyección, (vi) instrumentos de control (presión - volumen). En conjunto, constituye una opción económica y tecnológicamente sustentable.

Un método utilizado comúnmente para minimizar el efecto causado por incompatibilidad en deformación puntafuste, ablandamiento por la excavación y materiales sueltos en pilotes perforados, consiste en la inyección de lechada cementicia a presión en la punta después de la instalación del pilote. Existen métodos analíticos de diseño de pilotes perforados mejorados con esta técnica (Mullins y Winters, 2004). Sin embargo, es necesario desarrollar métodos que incluyan condiciones más amplias, como, por ejemplo, diferentes tipos de suelo, presiones variables en la lechada, volumen de la lechada, forma del bulbo en la punta del pilote y lechada que asciende entre el pilote y el suelo circundante. La utilización de esta técnica es altamente efectiva en suelos granulares con densidades de baja a medio densa, debido a que estos son más susceptibles a ser inyectados por la lechada dada su alta permeabilidad.

Aunque varios estudios presentan mejoramiento en la capacidad de carga, la cuantificación de este mejoramiento es compleja, dependiendo entre otras cosas del tipo de lechada, el tipo de suelo de fundación, la presión y el volumen de la lechada,

el dispositivo de inyección utilizado, etc. La disparidad en estos factores hace necesario que se estandaricen metodologías de análisis y diseño de este tipo de fundaciones.

En este artículo, se describe el proceso constructivo de este tipo de fundaciones profundas, se discute sobre el efecto de la lechada cementicia en el comportamiento del pilote y se presentan algunos casos de estudio reportados en la literatura técnica, en los cuales se obtuvo un mejoramiento evidente en la resistencia axial del pilote al utilizar la lechada cementicia.

## INYECCIÓN DE LA LECHADA CEMENTICIA

En general, la inyección se realiza en etapas aumentando sucesivamente la presión de inyección y disminuyendo la relación agua/cemento de la lechada. La presión máxima de inyección se calcula en base a la resistencia por fricción máxima del pilote, que debe equilibrar la fuerza ascendente generada en la punta del pilote con la inyección.

Los dispositivos de inyección consisten en tuberías que atraviesan el pilote hasta la punta, adosadas a la armadura de refuerzo. En la punta de las tuberías, se suelen colocar unas celdas que cuentan con mecanismos adecuados para permitir el traslado de la lechada al suelo que se encuentra bajo la punta del pilote. Algunas veces se utiliza un tubo con una serie de orificios y membranas (*tube-a-manchete*) que facilitan la inyección de la lechada. Este y otros dispositivos también utilizados para realizar la inyección pueden consultarse en Ho (1999). Después de que el pilote perforado se encuentra construido, se inyecta a presión la lechada cementicia a través de las tuberías.

Se presenta una precarga en la punta del pilote cuando la lechada es inyectada. De esta manera, se genera densificación y aumento en la rigidez del suelo debajo de la punta del pilote. Así mismo, la precarga produce un levantamiento en el pilote que genera una fricción negativa. La literatura también muestra evidencia del ascenso de lechada en el espacio entre el pilote y el suelo circundante, así como la formación de un bulbo de

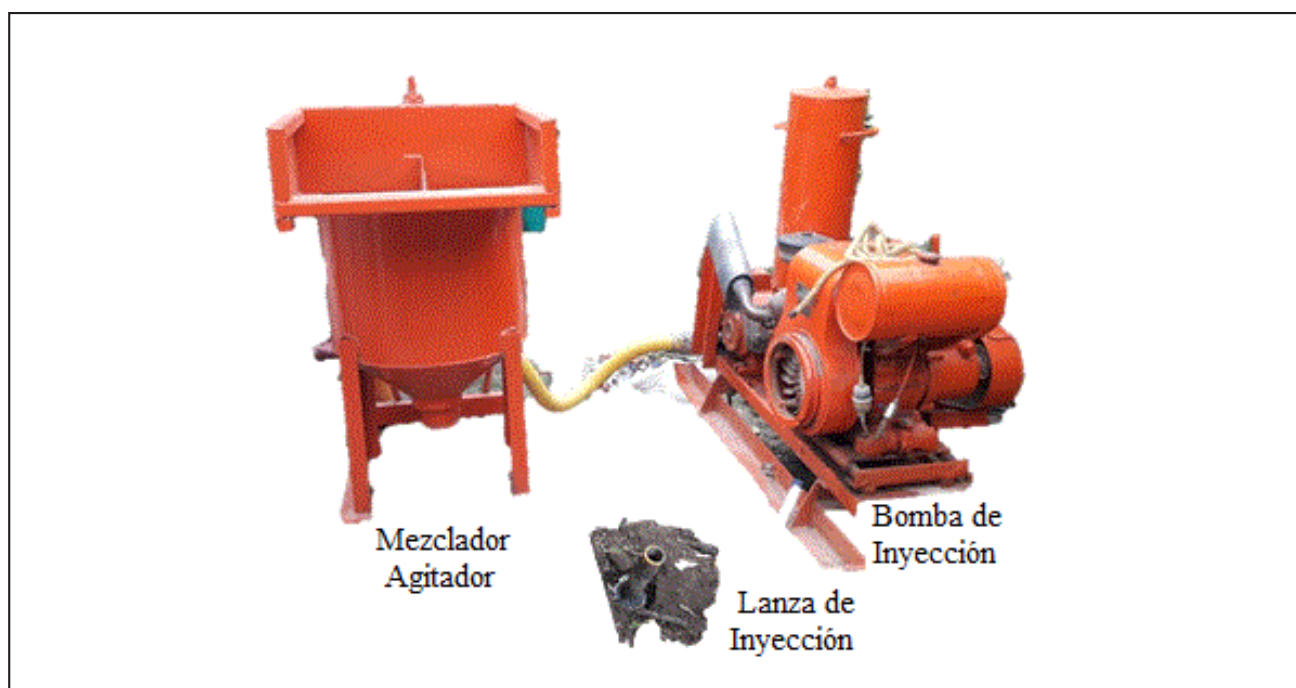


Figura 1. Equipo de inyección de lechada cementicia.

lechada en la punta del pilote. La lechada comienza a formar una zona de reforzamiento en la punta junto con el suelo circundante. La formación de la zona de reforzamiento aumenta el área de tensión y aumenta en gran medida la resistencia por punta del pilote (Zhou y Xie, 2019). El mejoramiento alcanzado en la capacidad de carga por punta del pilote se puede ver esquemáticamente en la Figura 2. El efecto de precarga obtenido por la inyección de lechada induce un desplazamiento en la punta del pilote, lo que hace que la resistencia por punta se movilice más rápido generando un aumento significativo en la resistencia axial en comparación a la alcanzada por los pilotes perforados convencionales.

### ESTUDIOS DE CASO

Los pilotes con inyección de lechada cementicia han sido utilizados con éxito en las últimas cinco décadas. En la literatura técnica se encuentran varios trabajos que documentan el comportamiento de pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta. La mayoría de estudios se realizan con ensayos de campo donde se verifica la respuesta del pilote ante cargas estáticas verticales. Así mismo, se han realizado estudios con modelos a escala y simulaciones numéricas, la mayoría con elementos finitos. Una revisión de trabajos publicados sobre el beneficio de este tipo de fundaciones fue presentada por los autores de este trabajo (ver Useche-Infante et al., 2022). En esta sección se presentan algunos estudios de caso, en los cuales se han instrumentado pilotes perforados con inyección de lechada cementicia para determinar el efecto de esta técnica sobre el comportamiento del pilote perforado.

#### Puente en el río Brazo, Texas, USA

En 2004, se amplió la estructura de un puente sobre el río Brazo en el condado de Brazoria, al suroeste de Houston, Texas. El puente tiene 13 m de ancho y 196 m de largo con una viga de placa continua de 178 m. Youn y Tonon (2010) obtuvieron un incremento alrededor del 30% en la resistencia axial de los pilotes perforados con inyección de lechada cementicia construidos para este proyecto. Según los autores, el incremento en la capacidad se debe principalmente al mejoramiento que se

presenta en el suelo bajo la punta con la inyección de lechada. Reportaron un incremento aparente en la fricción lateral del pilote, causada por la fricción inversa que causa el levantamiento del pilote cuando se aplica la lechada. Los pilotes estudiados tenían un diámetro de 1,830 mm y una longitud de 28.2 m. Estos pilotes estaban apoyados en arena densa. Para llevar a cabo la inyección de la lechada, colocaron 4 tubos en a lo largo de la armadura de refuerzo hasta la base, donde se instaló una celda de precarga para el proceso de inyección. La presión máxima alcanzada por la lechada fue de 2.2 Mpa. Los autores concluyeron que el mejoramiento producido en la resistencia por punta del pilote depende de la magnitud de la descarga inducida por el alivio de tensión en la lechada presurizada.

#### Viaducto en el nudo vial El Tropezón, Córdoba, Argentina

Gerbaudo et al. (2015) realizaron ensayos de carga estática en dos pilotes perforados con inyección de lechada en la punta. Los pilotes tuvieron 50 cm de diámetro y 6.50 m de longitud. Este estudio fue realizado en el viaducto El Tropezón, ubicado en la intersección entre la Av. Colón y la Av. Circunvalación, en la zona oeste de la Ciudad de Córdoba, Argentina. El suelo en la punta del pilote correspondió a limo arenoso. Para asentamientos superiores a 1.5 mm, los autores obtuvieron una relación entre la presión aplicada en la punta del pilote con inyección y sin inyección superior a 1.5. Otro estudio en este viaducto fue reportado por Ruiz y Cocco (2016), quienes presentaron los resultados de un estudio de transferencia de carga de un pilote convencional y otro, instalado en similares condiciones, con inyección de lechada cementicia en su punta. Los pilotes fueron construidos con diámetro de 600 mm y longitud de 6.5 m. Se inyectaron 0.107 m<sup>3</sup> de lechada a una presión máxima de 0.462 MPa por medio de una celda de precarga adherida a la parte inferior de la armadura del pilote. El objetivo de la investigación era determinar el incremento en la resistencia por punta del pilote, por lo que los autores redujeron la resistencia por fricción del pilote. Las curvas de transferencia de carga mostraron que a pesar de reducir de manera intencional la resistencia de fuste, la resistencia por fricción remanente aporta a la rigidez y resistencia del pilote con inyección de lechada cementicia.

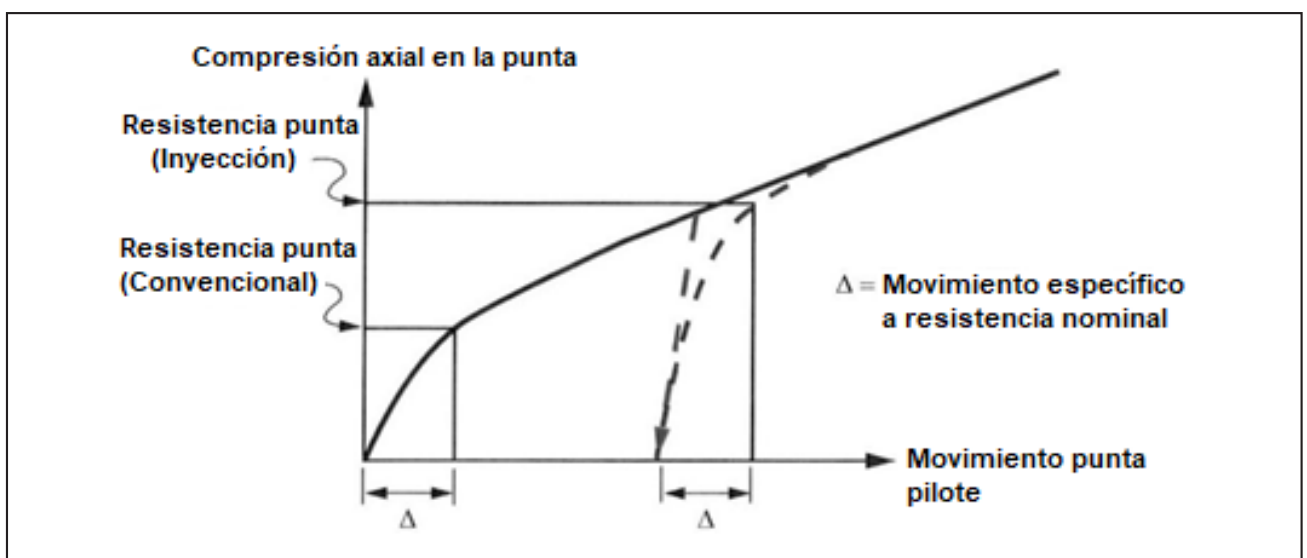


Figura 2. Resistencia axial.

Además, indicaron que el proceso de inyección sólo contribuye a incrementar la rigidez del pilote, pero no su resistencia final. Finalmente, los autores identificaron dos factores principales que podrían contribuir al mejor desempeño de estos pilotes: (1) un efecto de pretensión relacionado a la fricción negativa que se origina a lo largo del fuste durante el proceso de inyección, y (2) la posible formación de un bulbo de lechada bajo la punta del pilote que depende de la celda de precarga que se utilice. Encontraron que el efecto de densificación del suelo bajo la punta del pilote tiene una incidencia menor en la resistencia axial de los pilotes inyectados que los dos efectos mencionados.

### **Puente en el río Odra, Wrocław, Polonia**

*Krasiński y Wiszniewski (2018)* instrumentaron dos pilotes perforados de gran diámetro inyectados con lechada cementicia en la punta, en un puente sobre el río Odra, en el oeste de Polonia. Utilizaron extensómetros de cuerda vibrante para medir la deformación en varias secciones a lo largo de la longitud de la fundación. Los pilotes estudiados tenían un diámetro de 1,500 mm y 18.0 m de longitud. Inyectaron 420 L de lechada cementicia en la punta del pilote con una presión de 1.5 MPa por medio de tubos de inyección equipados en la parte inferior con válvulas de goma (*tube-a-manchette*). Utilizaron una geomembrana para separar la tubería de inyección de la armadura de refuerzo. El suelo en el cual fueron instalados los pilotes estaba formado por una capa superior de sedimentos fluviales de espesor variable entre 5.0 m y 7.0 m, compuestos por arena y grava de densidad media a densa. Los sedimentos fluviales descansaban sobre una capa de arcilla dura del pleistoceno. Los resultados de las pruebas de carga vertical en los pilotes convencionales y con inyección de lechada en la punta mostraron un incremento en la resistencia axial de aproximadamente un 200% gracias a la presencia de la lechada. Así mismo, se evidenció una disminución mayor a 211% en los asentamientos al inyectar la lechada. Los autores concluyeron que el mejoramiento se produce a lo largo del eje del pilote, siendo mayor el incremento en la capacidad del pilote en la zona cercana a la punta. Además, mostraron a través de los ensayos, que se incrementa significativamente la rigidez del suelo debajo de la punta del pilote por la acción de la lechada. La lechada debajo de la base del pilote activa y aumenta la resistencia del fuste del pilote y gracias a ello mejora las características de interacción del pilote perforado con el suelo. Ellos indicaron que la fuerza de la inyección ocasionó la precarga y la consolidación de la arcilla. Al mismo tiempo, indicaron que con la inyección de lechada se reducen la relajación y la alteración de la estructura del suelo creada durante la perforación.

### **Aeropuerto internacional Xi'an Xianyang, Shaanxi, China**

El Aeropuerto internacional Xi'an Xianyang es el más importante de la provincia china de Shaanxi. En esta importante obra de infraestructura, *Zhou y Xie (2019)* analizaron el mecanismo de mejora en la resistencia por punta de un pilote perforado con inyección de lechada. Con el objetivo de evitar la posible ruptura de las tuberías de PVC durante el proceso de inyección de lechada, los autores utilizaron tubería de acero. Las tuberías metálicas fueron adosadas a la armadura y se conectaron con tuberías en forma de U dispuestas en la punta del pilote, las cuales por medio de unas válvulas permiten la inyección de la lechada en el suelo bajo el pilote. Realizaron ensayos de carga estática a pilotes de 1,500 mm de diámetro por 22.0 m de longitud. El suelo en el sitio de construcción estaba formado por una capa de loess reciente con potencial de colapsabilidad,

ligeramente húmedo y poroso, con 8 m de espesor, apoyada en una capa de paleosol y otra de loess antiguo. El paleosol presentó un espesor variable entre 1.0 m y 6.0 m, mientras que el loess antiguo presentó un espesor entre 2.0 m y 15 m. La lechada fue aplicada con una presión de 2.5 MPa. En comparación con un pilote convencional, los resultados mostraron un incremento del 28.57% en la resistencia axial del pilote al inyectar la lechada en la punta. Así mismo, observaron que los asentamientos disminuyeron un 26.19% para una carga de 17,500 kN con respecto al pilote convencional. La parte superior del pilote se levantó 1.62 mm con la aplicación de la lechada. La interacción lechada-suelo mejora la rigidez del suelo bajo el pilote y disminuye el desplazamiento relativo del pilote, mientras que la fricción lateral aumenta gracias al cambio en la interface suelo-pilote generado por la inyección de lechada. Esta investigación además muestra que la inyección en la punta genera el ascenso de la lechada entre las paredes del pilote y el suelo circundante, reportaron un ascenso en la lechada de 10.7 m desde la punta del pilote.

### **Puente ferroviario a través del río Rupsa, Khulna-Satkhira, Bangladesh**

*Nagarajan et al. (2020)* reportaron un estudio sobre el efecto de la inyección de lechada en la punta en pilotes perforados de 1,500 mm de diámetro y longitudes de 40.0 m y 52.0 m. Los pilotes ensayados hacían parte del proceso de diseño de un puente ferroviario de 700 m de longitud que permitiría el paso entre las ciudades de Khulna y Satkhira a través del río Rupsa, en Bangladesh. Los pilotes estaban apoyados en arena limosa. Un volumen de 1,800 L de lechada fue inyectado con tuberías en U adosadas a la armadura del pilote, con una presión máxima de 6 MPa. La lechada fue aplicada en tres etapas, en las cuales se inyectaron 600 L, 750 L y 450 L, respectivamente. De acuerdo con los resultados, la resistencia axial de los pilotes fue incrementada en un 90% por efecto de la lechada. Así mismo, los asentamientos en el pilote disminuyeron gracias a la inyección de lechada.

### **Puente vehicular a través del río Parai y puente ferroviario a través del río Yapacani, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia**

*Marinucci et al. (2021)* presentaron los resultados de pruebas de carga a más de 120 pilotes perforados con el objetivo de estudiar el efecto de la inyección de lechada cementicia en la punta. La publicación reportada contiene el mecanismo de interacción, los principios básicos y la metodología de diseño. Los diámetros de los pilotes ensayados fueron 1,200 mm y 1,500 mm, mientras que las longitudes fueron de 15.0 m y 25.0 m. El sitio de la fundación tenía suelos sedimentarios con alta variabilidad. Inyectaron lechada cementicia en la punta del pilote por medio de una celda de precarga adosada a la armadura. Se obtuvieron incrementos significativos en la rigidez del suelo, mejora es la resistencia axial nominal del pilote y una mejor alineación de las curvas de transferencia de carga con los requisitos del proyecto.

### **Comparación de los resultados reportados en las investigaciones consultadas**

Con el objetivo de comparar el mejoramiento obtenido en la resistencia por punta del pilote cuando se inyecta la lechada cementicia, se realizaron graficas de la Relación de Presión (presión aplicada en la punta del pilote con inyección sobre la presión aplicada en la punta del pilote convencional) contra la



relación entre el asentamiento ( $S$ ) y el factor obtenido de la división de la longitud ( $L$ ) del pilote entre el diámetro ( $D$ ) del mismo. La Figura 3 muestra estas relaciones para los estudios reportados por *Youn y Tonon (2010)*, *Gerbaudo et al. (2015)*, *Krasiński y Wiszniewski (2018)*, *Zhou y Xie (2019)* y *Nagarajan et al. (2020)*. Los mayores valores de Relación de Presión se obtuvieron en los trabajos reportados por *Gerbaudo et al. (2015)* y *Nagarajan et al. (2020)*, quienes obtuvieron relaciones mayores a 1.4. Los demás estudios presentaron Relaciones de Presión mayores a 1.15. Para relaciones  $S/(L/D)$  mayores a 0.3, que corresponden a asentamientos superiores a 4 mm. Todos los estudios mostraron un incremento importante en la resistencia por punta al utilizar la inyección de lechada cementicia (Relaciones de Presión superiores a 1.10). Esto indica que, aunque se tienen pilotes perforados con diferentes condiciones de sitio y diferentes condiciones de inyección, la lechada en la punta genera beneficios en la resistencia por punta del pilote para valores de asentamientos normales. Además, según la Figura 3, todos los estudios excepto el publicado por *Youn y Tonon (2010)*, presentan un incremento creciente en la Relación de Presión a medida que se incrementa el asentamiento. En el caso específico del Puente en el río Brazo, reportado por *Youn y Tonon (2010)*, se presentan valores pico de la Relación de Presión (alrededor de 1.4) para relaciones  $S/(L/D)$  entre 0.13 y 0.23 (asentamientos entre 2 y 4 mm). Al incrementarse el asentamiento, la Relación de Presión cae hasta un valor asintótico de 1.15 para asentamientos mayores a 7 mm.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una revisión y análisis de la bibliografía acerca de la inyección de lechada cementicia en la punta de pilotes perforados. Se describen seis casos de estudio. Las principales conclusiones obtenidas del trabajo son:

La literatura técnica consultada muestra un incremento importante en la resistencia por punta y por fricción para pilotes perforados, siendo determinante en el incremento, el tipo de suelo debajo de la punta del pilote, el tipo de suelo alrededor del pilote y la presión de la lechada inyectada.

Se genera un bulbo de lechada en la parte inferior del pilote después de realizar la inyección, aumentando el área en la punta de la fundación. Este bulbo depende del dispositivo utilizado para inyectar la lechada y podría incrementar la capacidad por punta del pilote.

El suelo bajo la punta del pilote se densifica por la mezcla con la lechada. Esto aumenta la rigidez del suelo aumentando la capacidad de carga por punta del pilote. La aplicación de lechada en la punta genera una precarga en el suelo debajo del pilote, lo cual hace que se produzca levantamiento de la fundación y una fricción negativa a lo largo del fuste, aumentando la resistencia por fricción.

Se produce un desplazamiento de lechada en forma ascendente entre el borde del pilote y el suelo circundante, lo que disminuye el desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo, generando un aumento en la resistencia por fricción. Al incrementarse la resistencia axial total del pilote por la inyección, los asentamientos se ven disminuidos.

A pesar de que se han presentado varios trabajos que documentan el mejoramiento en el comportamiento de los pilotes al usar la lechada, es necesario aumentar los ensayos con diferentes condiciones de aplicación de la lechada, otros tipos de suelo de fundación y con dispositivos de inyección variados. De esta manera se puede optimizar el proceso constructivo y el diseño de esta técnica.

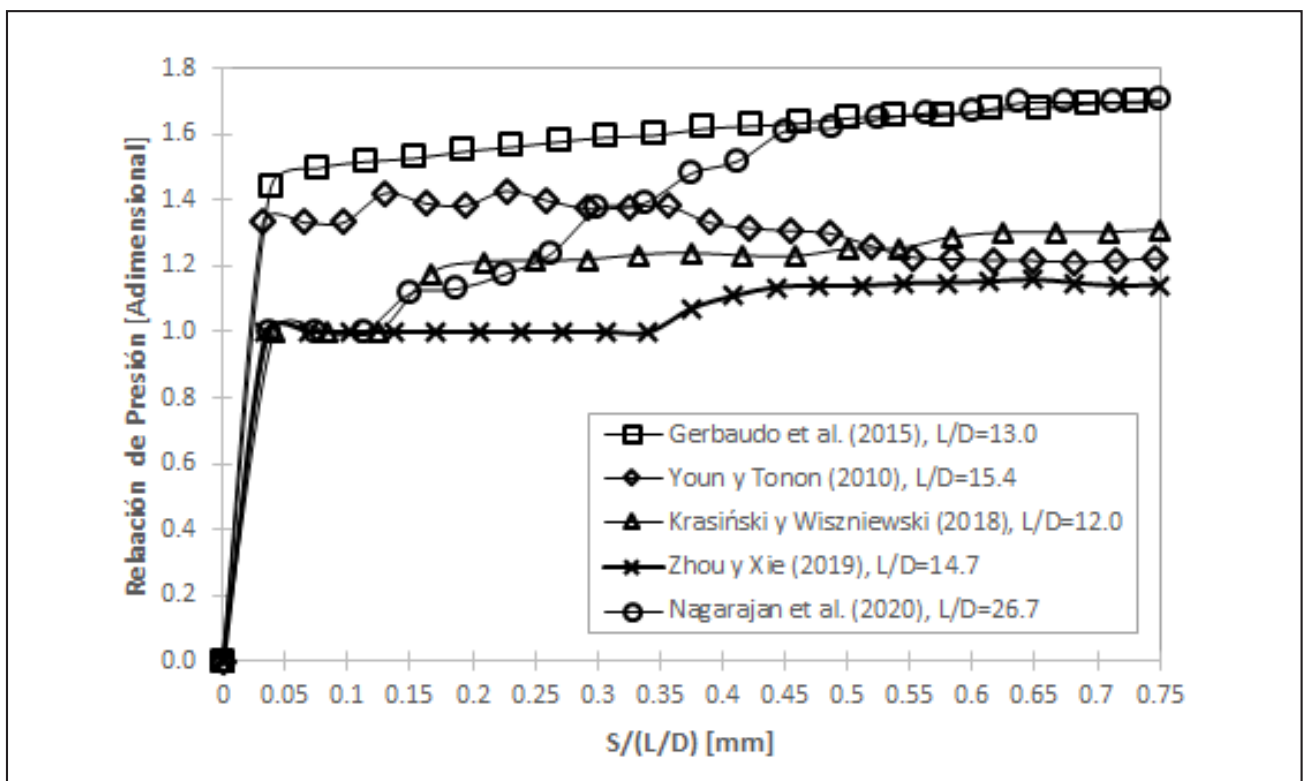


Figura 3. Comparación de la Relación de Presión obtenida en las investigaciones consultadas

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible debido al apoyo recibido por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (Departamento de Ingeniería Civil - GIGEF) y al CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- GERBAUDO, C.F., ZEBALLOS, M.E., GERBAUDO, G., ZECCHIN, E. Y FIGLIOZZI, L. (2015).  
Post grouted drilled shaft behavior.  
*From Fundamentals to Applications in Geotechnics: Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15 - 18 November 2015, Buenos Aires, Argentina, 1:398-405.*  
<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-398>
- HO, S.K. (1999).  
Construction considerations for on-site bored piles.  
*In: Proceedings of Conference on Design, Construction and Testing for Large-Diameter Drilled Shafts, Taipei: 3.1-3.25*
- KRASIŃSKI, A. Y WISZNIEWSKI, M. (2018).  
The mechanism of grouting action under the base of bored pile.  
*In: Proceedings of the 2018 DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Roma, pp 858-867*
- MARINUCCI, A., TERCEROS-HERRERA M.A. Y TERCEROS-ARCE M. (2021).  
Tip post-grouting using smart cells of 126 drilled shafts at two bridges in Bolivia.  
*In: Proceedings of International Foundations Congress and Equipment Expo 2021, ASCE.*  
<https://doi.org/10.1061/9780784483404.002>
- MULLINS, G. Y WINTERS, D. (2004).  
Pressure grouting drilled shaft tips-phase II.  
*Final report submitted to Florida Department of Transportation, Florida*
- NAGARAJAN, D., RAJA-RAJAN, K. Y VIJAYKUMAR, T. (2020).  
Review of load test performance of base grouted concrete piles.  
*Construction in Geotechnical Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering, vol 84. Springer, Singapore, 99 - 117.*  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-6090-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6090-3_8)
- RUIZ, M.E. Y COCCO, L.J. (2016).  
Pilotes con celda de precarga: estudio de caso de los pilotes de fundación del viaducto en el nudo vial El Tropezón de la ciudad de Córdoba.  
*24 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires, 1-18.*
- USECHE-INFANTE, D., AIASSA-MARTINEZ, G., ARRUA, P. Y EBERHARDT M. (2022).  
Performance evaluation of post-grouted drilled shafts: a review.  
*Innovative Infrastructure Solutions, 7:230.* <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00830-y>
- YOUN, H. Y TONON, F. (2010).  
Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: a case study at the Brazo River Bridge, TX.  
*Computers and Geotechnics, 37:456-465.*
- ZHOU, Z. Y XIE, Y. (2019).  
Experiment on improving bearing capacity of pile foundation in loess area by postgrouting.  
*Advances in Civil Engineering, Article ID 9250472.* <https://doi.org/10.1155/2019/9250472>