

Refuerzo con columnas de jet grouting en pilotes de Puente en Lima (Perú)

Reinforcement with jet grouting columns in bridge piles in Lima (Peru)

Campos M., Denisse¹; Tapia V., Nicolás²; Guzman G., Aldo³

¹Gerente técnico, Pilotes Terratest Perú, dcampos@terratest.com.pe

²Ingeniero de proyectos, Pilotes Terratest, ntapia@terratest.cl

³Gerente General Regional, Pilotes Terratest, ag@terratest.cl

Resumen

En la provincia de Barranca en Lima – Perú se ejecutaron 21 pilotes en la cimentación de los estribos de un puente, 10 pilotes para el estribo norte, todos empotrados en roca, y 11 pilotes en el estribo sur, los cuales no llegaban a la roca, sino que quedaban fundados en arena limosa densa que sobreyace al estrato de roca. El perfil de suelo en el puente consta de intercalaciones de arcillas, limos y arenas limosas hasta una profundidad variable de 7.5m y 22m, luego subyace brecha volcánica ligeramente fracturada. El ensayo de carga dinámica en el estribo norte, para los pilotes fundados en roca, entregó un resultado satisfactorio con una activación de carga de 2985 ton. Sin embargo, el segundo ensayo dinámico, en el estribo sur, reporta una capacidad última de 950 ton que corresponde al 97% de la carga de servicio, 75% de la capacidad geotécnica admisible y de este último sólo el 6% es la capacidad por punta admisible.

Bajo este escenario, se ejecutó el mejoramiento del suelo en la punta de los pilotes del estribo sur con columnas de jet grouting doble fluido (lechada y aire). Los ensayos de carga dinámica después del mejoramiento reportan una activación de carga de hasta 1.8 veces la carga de servicio y acorde al desplazamiento obtenido, se evidencia que la carga última de pilote es aún mayor.

El mejoramiento con columnas de jet grouting generó la cementación del suelo en la zona de punta de los pilotes, da continuidad con el estrato de brecha volcánica y permitió un aumento significativo de la capacidad por punta de los pilotes.

Palabras Clave: jet grouting, pilote, ensayo de carga dinámica, capacidad última.

Abstract

A total of thirty-three piles were built for the foundation of a highway bridge in Barranca province, Perú, twenty-one on the north abutment, all of them reached the bedrock, and eleven on the south abutment with the tip on dense silty sand, 2-5 meters over the bedrock. The dynamic pile load test executed on the north abutment was satisfactory, with an activated load of 2985 ton. The second load test on the south of the bridge, was unsatisfactory, reaching only 97% of the service load.

A soil improvement below and over the tip of the eleven south end piles was performed, using double fluid jet grouting (air plus cement grout). The load test performed after the soil improvement reports an activated load of 180% the service load, with little settlement of the pile, which indicates a much higher ultimate load. The jet-grouting treatment generated a continuity of high resistance soil-cement, which can transfer more efficiently the pile tip loads to the underlying bedrock.

Keywords: jet grouting, pile, underpin, soil improvement, Dynamic load test, ultimate capacity.



1 Introducción

El *jet grouting* es una tecnología de mejoramiento de suelo que consiste en la inyección de fluido a alta velocidad a través de pequeñas boquillas que erosionan el suelo circundante mientras que las boquillas se rotan y desplazan a la superficie del terreno a una velocidad constante. El suelo erosionado se mezcla con lechada de cemento para formar un suelo – cemento en forma de columna (Wang Z. F. et al., 2013).

Van der Stoel, A. E. C. (2001) explica que el *Jet grouting* fue aplicado por primera vez en 1950 por *Cementation Co.* en Pakistán, luego de 1965 los hermanos Yamakado en Japón realizaron un estudio más amplio y en los 1970's se desarrollaron dos métodos de *jet grouting* en simultaneo. El primer método desarrollado por Nakanishi se denomina *Chemical Churning pile* o *CCP jet grouting* y consiste en inyectar lechada de cemento o químico a presiones ultra altas a través de boquillas de 1 a 2mm de diámetro ubicada en la parte inferior de una sola barra de perforación, la barra gira creando una columna de suelo – cemento. El segundo método desarrollado por Yahiro se denomina *Jet grouting* y consiste en el corte, reemplazo y cementación del suelo mediante el uso de varillas concéntricas que suministran agua, aire y lechada de cemento. En Japón han aparecido diversas modificaciones del sistema de inyección de lechada, la más importante fue el uso de lechada de cemento encapsulada en aire, creando la *Jumbo Special Grout (JSG)*, que es capaz de proporcionar columnas con diámetros de 1.5 a 2 veces mayores que las columnas de CPP.

En términos generales, Kutzner C. (2020) describe el procedimiento de ejecución de *Jet grouting* como la perforación de un pozo a una profundidad deseada, para proceder luego a la erosión del suelo por desintegración y mezcla in situ. Los procedimientos inician con alta presión bajo rotación y traslación de las boquillas y el material erosionado se mezcla parcialmente con la suspensión desarrollando un elemento de suelo y suspensión. Parte del material mezclado es extraído a la superficie en una proporción de mezcla similar a la que se encuentra alrededor del pozo y se le denomina resurgencia, la cual debe eliminarse del lugar. Este procedimiento se puede repetir superponiendo los elementos para formar una estructura tipo pared.

Actualmente existen tres sistemas más utilizados cuya diferencia radica en el número de fluidos que se inyectan y los radios efectivos que se logran (Ver Fig. °1). Los sistemas se conocen como monofluido o Jet 1, doble fluido o Jet 2 y triple fluido o Jet 3. El Jet 1 utiliza sólo inyección de lechada de cemento que genera por una parte la disgregación del terreno, y por otra su mezclado con el mismo. El Jet 2 utiliza dos fluidos que puede ser lechada de cemento y agua o lechada de cemento y aire. Cuando usamos agua, el tratamiento del terreno se realiza a través de dos toberas desplazadas verticalmente y la disgregación del terreno se realiza con ayuda de agua a alta presión, por la tobera superior, y la inyección de relleno de lechada de cementos se realiza a menor presión por la tobera inferior. Cuando usamos aire, los chorros son concéntricos, el aire potencia la acción de rotura del terreno, el mezclado de la lechada de cemento y favorece la evacuación del detrito. El jet 3 consiste en envolver con aire comprimido el chorro de agua a alta presión del Jet 2, que se inyecta por las toberas superiores para romper el terreno, para luego rellenarlo con lechada de cemento inyectada por las toberas inferiores.

Los diámetros efectivos promedios que se pueden alcanzar para los distintos sistemas varían según el tipo de suelo. En suelo granular, los diámetros efectivos dependen de la densidad; a mayor densidad, menor diámetro esperable. En suelos finos, los diámetros efectivos dependen del índice de plasticidad y la consistencia y los valores límites es una cohesión no drenada de 40kPa y un límite líquido de 40 (Kutzner C., 2020). Croce, P. (2019) presenta algunos valores típicos de diámetros efectivos de 0.4 m a 1.2m para el Jet 1, de 0.6 m a 2.5m para el Jet 2 y de 0.8 m a 3 m para el Jet 3, por supuesto dependiendo del tipo de suelo.

Por otro lado, Modoni G. y Bzówka J. (2012) expone que las normativas disponibles presentan distintos enfoques. El código japonés (JJGA, 2005) proporciona valores de diseño del diámetro de columna y la resistencia del suelo cementado como funciones del sistema de inyección de lechada (Jet 1, 2 y 3) y las propiedades del suelo no perturbado y gestiona la incertidumbre con factores de seguridad globales fijos

para varias estructuras. Los estándares europeos (EN 12716, 2001) y guía de EEUU (G.I. ASCE, 2009) no dan valores típicos para las propiedades del *Jet grouting* pero enfatiza en la ejecución de pruebas de campo preliminares y control de calidad a través de ensayos.

La técnica del Jet-Grouting se viene aplicando tanto en obras nuevas como en obras de recalce o de refuerzo, sean permanentes o provisionales. Este sistema tiene la ventaja de realizarse con maquinaria pequeña, aplicable en espacios reducidos y las columnas no presentan problemas de durabilidad. Sus aplicaciones más comunes son en el recalce de cimentaciones, prolongación de cimentaciones profundas, protección de estructuras frente a excavaciones próximas, ejecución de paraguas y bóvedas en túneles (Guateri et al., 1988) y pantallas de impermeabilización, entre otros.

La metodología aplicada en el caso de estudio representa una aplicación de los estándares europeos y la eficiencia del tratamiento se verificó con cancha de pruebas, ensayos antes y después de la ejecución del *Jet grouting*.

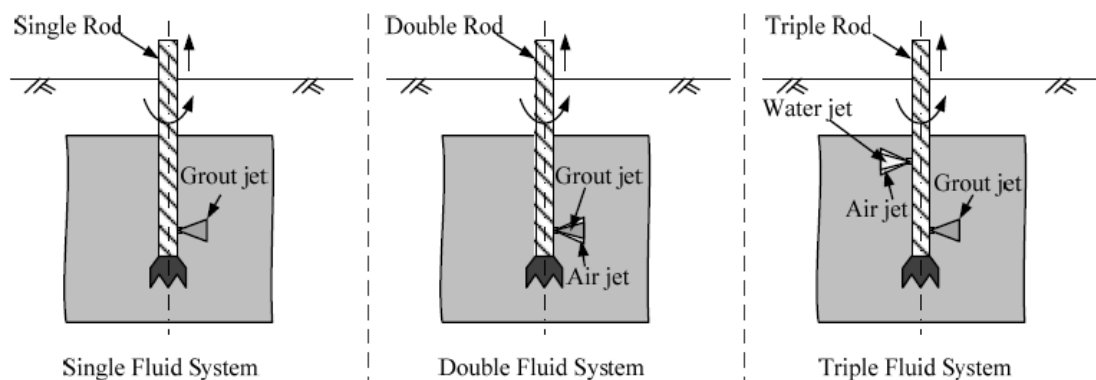


Fig. 1 – Sistemas de Jet grouting convencionales (Wang Z. F. et al., 2013)

2 Características generales del proyecto Puente en Lima

El proyecto Puente Fortaleza se ubica en el km 213+226 de la Panamericana Norte, en la provincia de Barranca, departamento de Lima (Perú) y consta de 2 estribos (norte y sur) cimentado en 21 pilotes 1200mm de diámetro, excavados con camisa recuperable. El estribo norte posee 10 pilotes de 15m de longitud, los últimos 6m se encuentran empotrados en roca ligeramente fracturada y el estribo sur posee 11 pilotes de 20m de longitud, el suelo circundante consta de intercalaciones de arcillas, limos y arenas limosas y la punta del pilote se aloja en arena limosa media a densa que sobreyace del estrato de brecha volcánica ligeramente fracturada. En la Fig.º2 se esquematiza el estribo norte y sur, los pilotes y los suelos indicados según el proyecto original.

Después de ejecutados los pilotes, se realizaron ensayos de integridad del tipo sónico de baja deformación (PIT) y ultrasónico (CSL) para verificar la continuidad de todos los elementos. Los resultados de los ensayos de integridad indican que todos los pilotes son aceptables y continuos en profundidad. Asimismo, se realizaron 2 ensayos de carga dinámica, uno en el estribo norte y uno en el estribo sur. El ensayo realizado en el estribo norte presenta una carga activada de 2985 ton, que corresponde a 3.48 veces la carga de servicio (carga a la que estará sometida el pilote en la vida útil del proyecto); el desplazamiento en la zona superior del pilote fue de 11 mm, el desplazamiento en la punta fue de 3.5 mm y el 8.4% de la carga total activada corresponde a la punta del pilote. Dado que el desplazamiento en la punta del pilote es menor al criterio de falla para ensayos dinámicos ($D/60$; siendo D el diámetro del pilote documentado por Rausche et al., (2008)), la carga última del pilote es mucho mayor a la carga activada en el ensayo.

El ensayo realizado en el estribo sur presenta una carga activada de 950 ton, que corresponde al 97 % de la carga de servicio del pilote y el 75 % de la carga admisible del diseño geotécnico; el desplazamiento en la zona superior del pilote fue de 21.2 mm, el desplazamiento en la punta fue de 18.2 mm y el 8.4% de la

carga total movilizada corresponde a la punta del pilote. La carga movilizada en el ensayo se reporta como carga última del pilote debido a que el desplazamiento de la punta está casi en el límite del criterio de falla para ensayos dinámicos. El pilote ensayado en el estribo sur no fue aceptado debido a que la carga última es menor a la de carga de puesta en servicio.

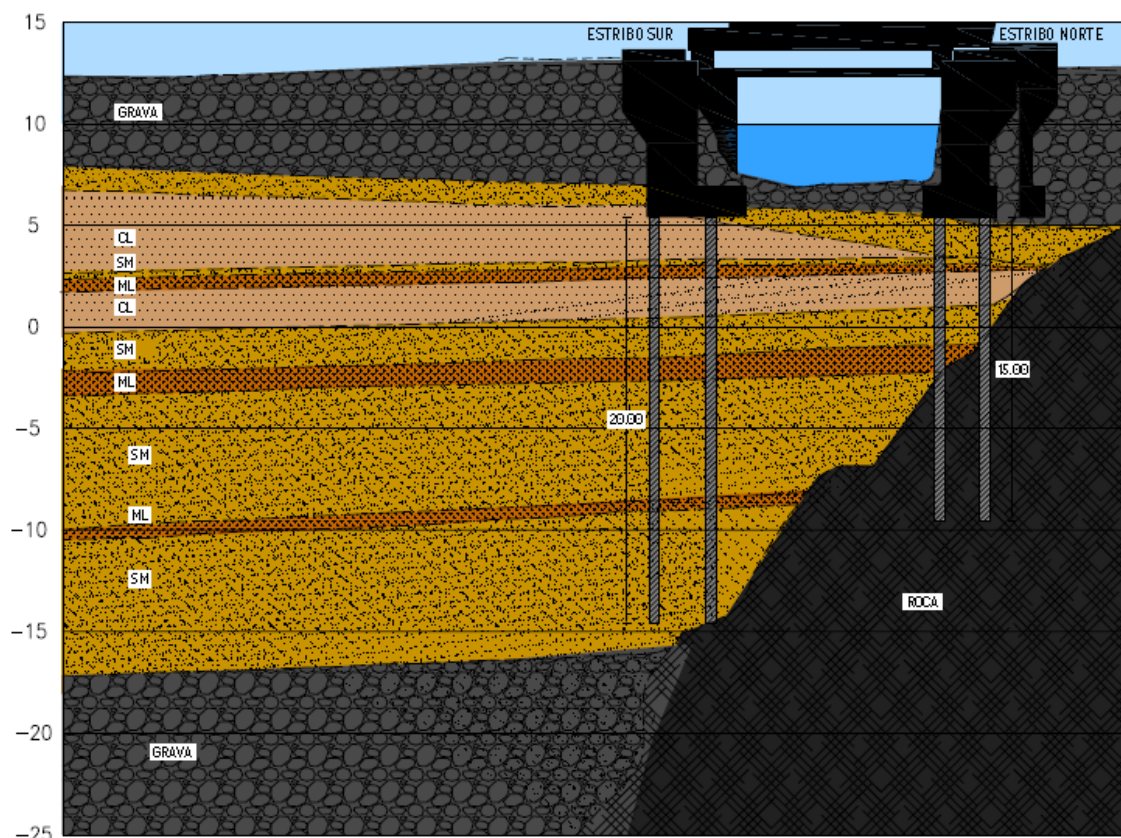


Fig. 2 – Perfil de suelo en los estribos norte y sur del puente Fortaleza.

3 Mejoramiento de suelo con columnas de Jet Grouting

Ante la evidente falta de capacidad de los pilotes del estribo sur respecto a lo proyectado, y en especial a la deficiente carga última de punta verificada, se diseñó un refuerzo mediante columnas de *Jet Grouting* en la punta de los pilotes, tal como se muestra en la Fig.°3. La propuesta de columnas de *Jet Grouting* tiene como objetivo cementar el terreno circundante en al menos los tres últimos metros de fuste y la punta del pilote hasta llegar al contacto a grava o roca muy fracturada (estrato superior detectado en las perforaciones por encima de la roca ligeramente fracturada), incrementar la capacidad portante del terreno y generar continuidad con la brecha volcánica ligeramente fracturada.

La tecnología propuesta considera la ejecución de inyección de lechada de cemento a alta energía cinética en el suelo existente; que al variar diversos parámetros en su ejecución (velocidad de ascenso, presiones, rotación, etc.), genera una columna continua de suelo-cemento de diámetro, profundidad controlada y con resistencia e impermeabilidad mejorada. En el estribo sur del puente se realizaron 44 columnas de Jet Grouting, a razón de 4 columnas de 1.5m de diámetro por pilote.

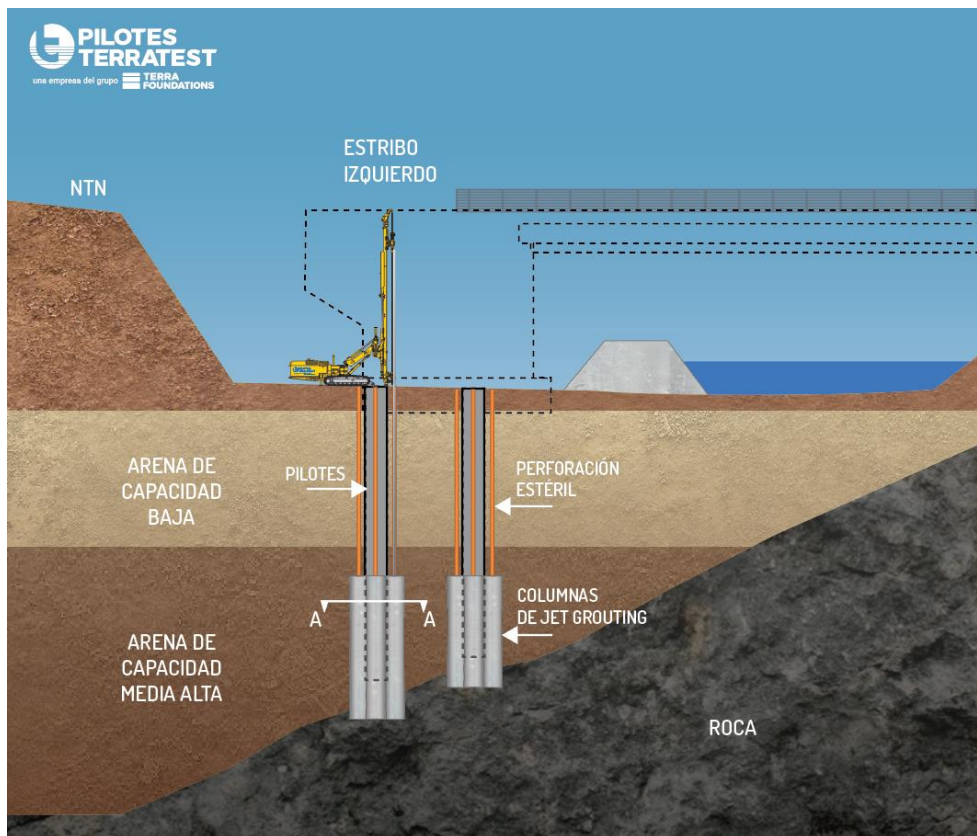


Fig. 3 – Proyección de columnas de *Jet grouting* ejecutadas en el estribo sur.

3.1 Cancha de pruebas previo a la ejecución

Previo a la ejecución de las columnas de *Jet Grouting* en cada pilote, se realizaron pruebas en terreno o también denominada “cancha de pruebas” en suelos similares a los de la aplicación final, con el fin de determinar el alcance de los distintos tipos de jet y elegir los parámetros controlados del sistema para obtener el diámetro de columna definido por el proyecto de recalce. Los parámetros a calibrar en la cancha de prueba se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros de control en el sistema *Jet Grouting*.

Parámetro	Dependencia
Método de Jet Grouting	Independiente
Presión de inyección (P_i)	Independiente
Caudal de inyección (Q_i)	Dependiente f (P_i , N , D_t)
Diámetro de tobera (D_t)	Independiente
Cantidad de toberas (N)	Independiente
Velocidad de ascenso (V_a)	Dependiente f (e , t)
Velocidad de rotación (V_r)	Dependiente f (N_p , t)
Escalón (e)	Independiente
Tiempo de escalón (t)	Independiente
Número de pasadas por escalón (N_p)	Independiente
Relación agua-cemento (a/c)	Independiente
Densidad de la lechada (d_L)	Dependiente f (a/c)

Con el fin de realizar un análisis más exhaustivo en la ejecución a distintos niveles de profundidad, se ejecutaron 2 columnas de prueba (PP1: Jet 1 y PP2: Jet 2 de lechada + aire) de longitudes variables y se aplicó la metodología de “sondeos de tubos”, que consiste en instalar tubos de acero pintados de distintos colores y a distancias predeterminadas respecto al eje de la columna de prueba, estas distancias están en función del diámetro a alcanzar. En este caso, se instalaron 3 tubos: color verde (radio de 60 cm), color rojo (radio de 75 cm) y color amarillo (radio de 85 cm) hasta alcanzar el contacto con la grava o roca de fondo ligeramente fracturada, aproximadamente a los 22.5 m de profundidad. Durante la perforación de las columnas de prueba y de los tubos se realizó la medición de desvíos mediante un inclinómetro especial montado en el equipo, estas medidas se pueden monitorear para distintas profundidades.

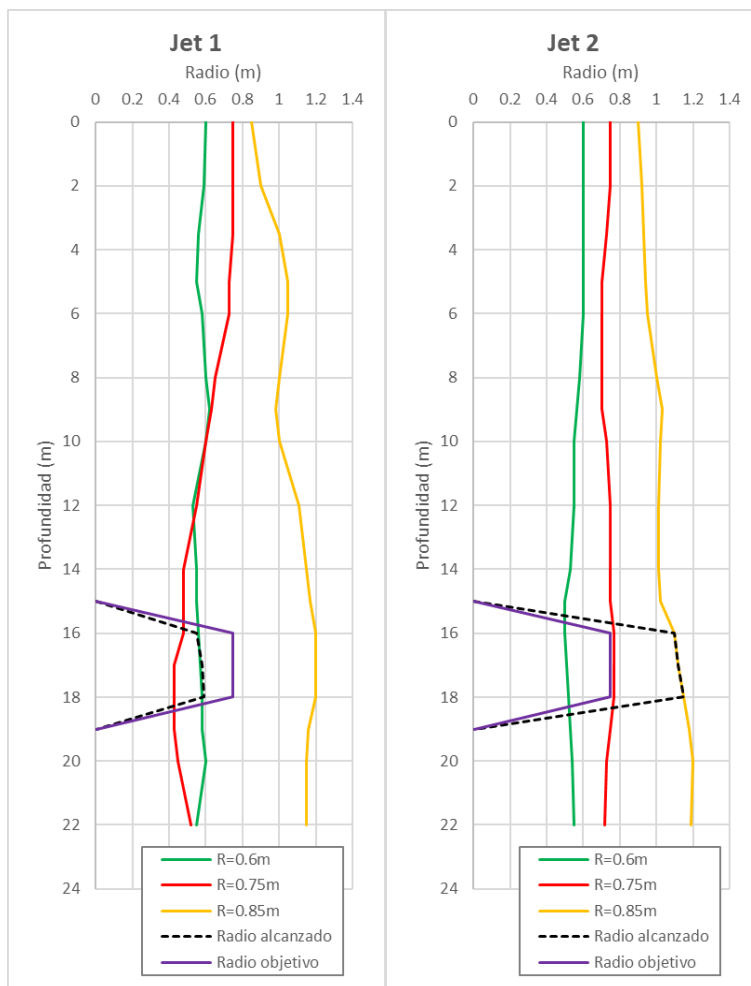


Fig. 4 – Radios alcanzados en las columnas de pruebas Jet 1 y Jet 2.

Durante la ejecución del *Jet Grouting*, el suelo circundante es erosionado hasta llegar a los tubos instalados y se refleja en el desprendimiento de la pintura, lo cual es un indicador del radio alcanzado. Finalizado el tratamiento, los tubos son extraídos cuidadosamente y colocados en forma horizontal para analizar los sectores (profundidades) y grado de erosión de estos. En la Fig.º4 se presentan los radios alcanzados con el sistema de Jet 1 (columna PP1) y Jet 2 de lechada por tobera central y aire por tobera concéntrica (columna PP2); el resultado indica que la columna PP2 supera el radio objetivo con un mínimo de 102 cm, confirmando entonces el sistema y parámetros a utilizar.

3.2 Ejecución de columnas de *Jet grouting*

Las columnas de Jet Grouting de cada uno de los 11 pilotes del estribo sur se diseñaron con 1.5m de diámetro y longitudes variables de entre 6 a 8m. Parte de la columna se encuentra por debajo del pilote y otra por encima del pilote con el fin de mejorar la capacidad de fuste de los últimos 3m. La ejecución de las columnas se realizó desde una cota de plataforma de 1.5m por encima del nivel de fondo del encepado, por lo que la longitud de perforación en terreno natural fue de 21.5m. El sistema de perforación aseguró un correcto barrido del material perforado hacia la superficie, aplicando luego el sistema de inyección Jet 2 con los parámetros determinados según la cancha de pruebas previa y con una longitud promedio de 6.7m por columna. Sin embargo, durante la ejecución se detectó que en el terreno después de 23.5 m a 27 m de profundidad se encontraban bolones y fragmentos de roca aislados que no podían ser atravesados fácilmente y requería replantear el punto de la ubicación de la columna jet alrededor del perímetro del pilote, buscando un nuevo emplazamiento libre de este tipo de obstáculos que permitan alcanzar la cota de tratamiento prevista debajo de la punta del pilote.

La resistencia a la compresión simple de la columna de Jet Grouting se dimensionó de 8MPa para obtener la capacidad por punta faltante tomando como base el ensayo de carga dinámica realizado y se obtuvo la cantidad de cemento necesaria para esta resistencia. Con base en experiencias ya ejecutadas, Croce P. (2019) documenta rangos de resistencia a la compresión uniaxial para diferentes tipos de suelo inyectados con lechada de cemento, que permite predimensionar la cantidad de cemento que requiere el mejoramiento. La resistencia a la compresión uniaxial varía de 1 MPa a 10 MPa para suelos granulares finos y de 10 MPa a 30 MPa para suelos granulares gruesos. Croce P. (2019) muestra gráficamente que para 8 MPa de resistencia se requiere aproximadamente 300 kg/m³ de cemento considerando el límite inferior de un suelo tipo arena limosa, la relación de agua cemento aplicada fue de 0.9. Para garantizar el control de calidad de la lechada, se realizaron ensayos de densidad a la mezcla en estado fresco y resistencia a compresión simple en estado endurecido a las edades de 7 y 14 días. La resistencia de la lechada asciende a 12 MPa y 14 MPa a 7 y 14 días, respectivamente.

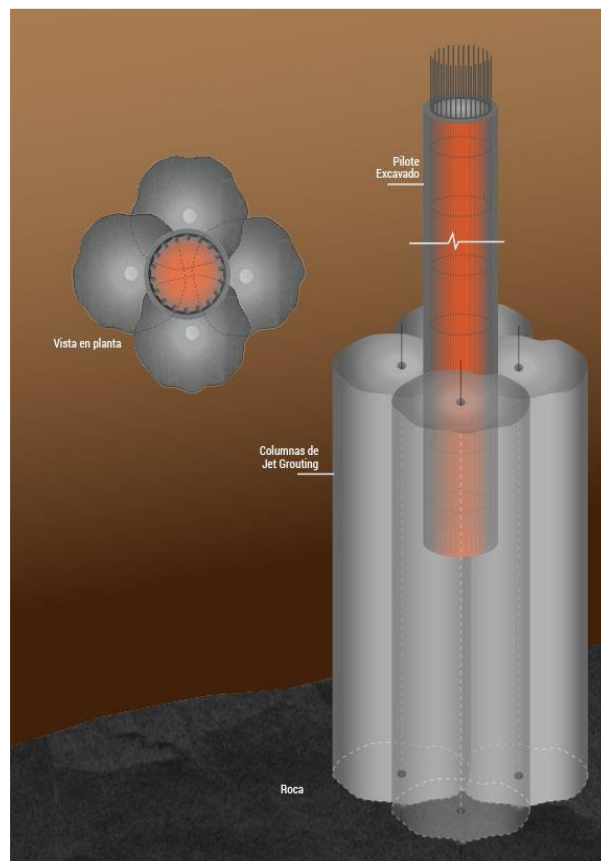


Fig. 5 – Esquema de columnas de *Jet Grouting* ejecutadas en cada pilote.



El área de punta de pilote que será cubierta por las columnas de jet se dimensionó considerando que el desvío máximo de la perforación es de 1% de la longitud, cumpliendo un mínimo del 70% del área de la base del pilote con mejoramiento. De los resultados de la cancha de pruebas en la que se alcanzaron a sobrepasar el diámetro de 1.7 m para el sistema Jet 2 (lechada y aire), podemos deducir que el área real cubierta puede llegar a 90% como se observa en la Fig.°5.

4 Resultados del mejoramiento con columnas *Jet grouting*

Se realizaron dos ensayos de carga dinámica en pilotes distintos para verificar la efectividad del tratamiento. La configuración de la instrumentación obedece a los ítems 5.2.4.1 y 6.11 de la norma *ASTM D4945* (2008). En el pilote denominado P-01, la masa no se liberó con la caída libre perfecta mientras que en el pilote P-05 se aseguró la caída libre correcta con el uso de un gatillo que mantiene suspendida la masa antes de soltarla.

Los resultados de los ensayos de carga dinámica ejecutados después del tratamiento muestran una capacidad de carga activada mayor a la capacidad admisible del diseño geotécnico y los desplazamientos en la punta del pilote registrados durante el ensayo ascienden al 20% del desplazamiento correspondiente al criterio de falla definido para ensayos dinámicos, lo que indica que la carga última del pilote es mucho mayor a lo obtenido en el ensayo. En la Tabla 2 se presenta el resumen de los resultados de cargas activadas en los pilotes antes y después del mejoramiento de suelo, se logró activar hasta 1.47 veces la capacidad total admisible siendo el 27.6 % de esta carga lo que corresponde a la capacidad por punta y 1.89 veces la carga de servicio del pilote. Considerando los resultados del pilote P-05 que posee un desplazamiento en la punta que asciende a sólo 2.9 mm y dado que la capacidad última del pilote es aquel que desarrolla un desplazamiento en la punta de 20 mm, se puede estimar de manera simplificada que la carga última del pilote es de 4620 ton y la capacidad ultima de la punta es de 3280 ton, valores considerablemente mayores.

Durante los ensayos de carga dinámica no se pudo activar mayor carga debido a que se utilizó todo el recorrido de caída libre disponible de la estructura definida para tal fin, el cual asciende a 2 m de altura. A pesar de toda la energía transferida durante el ensayo, la punta de los pilotes se encuentra en un suelo cementado que para desarrollar un mayor desplazamiento requiere de una mayor masa o altura de caída. Sin embargo, existe una variable adicional a tener en cuenta, y es que los pilotes serán parte de la estructura definitiva del puente, por lo que durante el ensayo se controlan las compresiones y tensiones del concreto de los pilotes con el fin de custodiar su capacidad estructural.

Tabla 2 – Resultados de ensayos de carga dinámica antes y después de mejoramiento de suelo.

Datos y resultados de ensayos	Diseño geotécnico admisible	Antes de tratamiento P-3	Después de tratamiento P-1	Después de tratamiento P-5
Carga por fuste (ton)	46.80	870.00	1010.00	1340.00
Carga por punta (ton)	1266.70	80.00	280.00	510.00
Capacidad total (ton)	1259.20	950.00	1290.00	1850.00
Carga por punta activada/Carga por punta de diseño admisible		0.06	0.22	0.40
Carga total activada/Capacidad total admisible		0.75	1.02	1.47
Carga total activada/Carga de servicio del proyecto		0.97	1.32	1.89

En la Fig.°6 se presenta los gráficos carga desplazamiento de los 3 pilotes ensayados en el estribo sur, uno antes del mejoramiento denominado P-3 y dos después del mejoramiento de suelo denominados P-1 y P-5. Los desplazamientos en línea discontinua corresponden a lo registrado en la punta de los pilotes y el criterio de falla para ensayos dinámicos (D/60) que corresponde a 20 mm para pilotes de 1200 mm de diámetro. Es claro que el ensayo del P-3 (antes del mejoramiento) tiene un desplazamiento en la punta cerca al criterio de falla, y la carga por punta desarrollada es sólo el 6 % del diseño geotécnico admisible. Los desplazamientos en la punta de P-1 y P-5 son de 4 mm y 2.9 mm y la carga por punta desarrollada es de 22 % y 40 % del diseño geotécnico admisible, respectivamente.

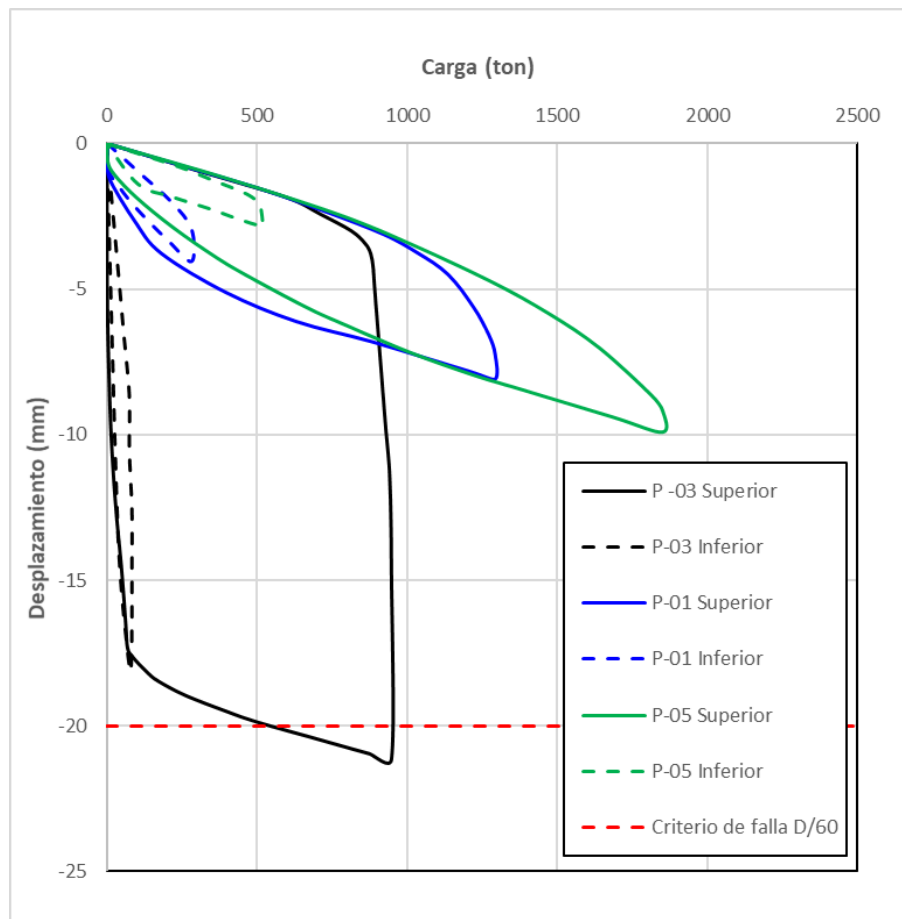


Fig. 6 – Carga – desplazamiento de los pilotes ensayados antes y después del mejoramiento.

5 Conclusiones

El ensayo de carga dinámica ejecutado inicialmente en el estribo sur del puente Fortaleza refleja que la carga última del pilote por punta llegaría a apenas el 6 % de la carga admisible por punta del diseño geotécnico. Este resultado genera la necesidad de ejecutar el mejoramiento de suelo en la punta de los pilotes del estribo sur.

La alternativa de mejoramiento de suelo seleccionada consistió en columnas de *Jet Grouting* en la punta de los pilotes, con el objetivo de cementar el terreno circundante en al menos los tres últimos metros y la punta de cada pilote, traspasando la carga a la roca inferior, una brecha volcánica ligeramente fracturada.

Las columnas de *jet grouting* de cada uno de los 11 pilotes del estribo sur se diseñaron con 1.5m de diámetro y longitudes variables de entre 6 a 8m, parte de la columna se encuentra por debajo del pilote y otra por encima del pilote con el fin de mejorar la capacidad de fuste de los últimos 3m. El sistema de perforación de las columnas aseguró un correcto corte y barrido del material perforado hacia la



superficie, aplicando luego el sistema de inyección Jet 2 como resultado de la cancha de pruebas previa. La longitud promedio de columnas ejecutadas fue de 6.7m.

Finalizado el mejoramiento de suelo, se realizaron dos ensayos de carga dinámica para evaluar la funcionalidad y calidad del tratamiento realizado. Los resultados de los ensayos de carga dinámica ejecutados después del tratamiento lograron activar hasta 1.89 veces la carga de servicio del pilote, 1.47 veces la capacidad total admisible siendo el 27.6 % de esta carga lo que corresponde a la capacidad por punta. De esta manera, se verifica que el mejoramiento de suelo aumenta la capacidad por punta última de los pilotes estimada de forma simplificada en 3280 ton, y la carga activada total en los ensayos supera la carga de servicio a la que estarán sometidos los pilotes en su vida útil.

6 Referencias

Guatteri, G., Kauschinger, J. L., Doria, A. C., & Perry, E. B. (1988, June). Advances in the construction and design of jet grouting methods in South America. In Proceedings, second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, June, St. Louis, Missouri (pp. 1037-1046).

Van der Stoel, A. E. C. (2001). Grouting for pile foundation improvement.

ENV 12716 (2001). Execution of special geotechnical works: jet grouting. European Committee for Standardization.

Japanese Jet Grouting Association, (2005). Jet Grouting Technology—JSG method, Column Jet Grouting method. Technical Information, 13th edition (English translation), October 2005, 80 pages

Rausche, F., Likins, G., & Hussein, M. H. (2008). Analysis of post-installation dynamic load test data for capacity evaluation of deep foundations. In From Research to Practice in Geotechnical Engineering (pp. 312-330).

ASTM D4945 (2008). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations.

Geo Institute of ASCE, Grouting Committee, (2009), Jet grouting Guideline, American Society of Civil Engineers, 29 pages.

Modoni, G., & Bzówka, J. (2012). Analysis of foundations reinforced with jet grouting. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(12), 1442-1454.

Wang, Z. F., Shen, S. L., Ho, C. E., & Kim, Y. H. (2013). Jet grouting practice: an overview. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 44(4), 88-96.

Croce, P. (2019). Jet grouting: technology, design and control. CRC Press.

Kutzner, C. (2020). Grouting of rock and soil. CRC Press.