

ENTIBACIÓN MIXTA EN RELLENO ANTRÓPICO EN SANTIAGO

Sebastián Boldrini López

Gerente de Proyectos Especiales, Pilotes Terratest S.A.

s.boldrini@terratest.cl – Alonso de Córdova 5151 Of. 1401, Las Condes, Santiago, Chile

Macarena Ayarza Cava

Gerente Técnico, Pilotes Terratest S.A.

mayarza@terratest.cl – Alonso de Córdova 5151 Of. 1401, Las Condes, Santiago, Chile

Resumen

Este artículo presenta el sistema de entibación mixto ejecutado para el sostenimiento de la excavación vertical para el proyecto de subterráneos de dos edificios ubicados en Avenida Los Conquistadores, comuna de Providencia, en la ciudad de Santiago de Chile. El suelo a contener consiste en potentes estratos de relleno antrópico heterogéneo que se desarrollan hasta los 24m de profundidad y a partir de la cual subyace la grava fluvial típica de Santiago.

Las características geotécnicas y la gran profundidad de excavación en el relleno, implicó la consideración de grandes empujes de diseño y desafíos interesantes para lograr una entibación factible a nivel técnico y económico. La solución diseñada y ejecutada consistió en una pantalla de pilotes discontinuos arriostrados con anclajes postensados de gran capacidad, dispuestos con inclinaciones de 45° para desarrollar su bulbo en profundidad en la grava de Santiago. Adicionalmente, con el fin de mantener el relleno estable entre pilotes, se ejecutaron columnas semicirculares de jet grouting entre ellos.

Este proyecto es inédito en Chile en la aplicación de la técnica de Jet Grouting combinada con pilotes discontinuos y presenta temas interesantes respecto al uso de técnicas mixtas en entibaciones.

Palabras Clave: entibación, pilotes, jet grouting, anclajes postensados, relleno antrópico

Abstract

This article presents the retaining mixed system developed for the vertical excavation for the project of two buildings, located in Avenida Los Conquistadores in Providencia, where heterogeneous man-made fillings (anthropic fillings) can be found up to 24 meters deep. Below the filling, the soil known as “typical gravel of Santiago” appears.

The great depth of the excavation, mostly in fillings, implies a big amount of earth pressure over the retaining system and provides an interesting challenge in order to achieve a technical and economical feasible solution. The retaining system consists in a non-continuous pile wall supported by high-capacity active anchors. In order to maintain the stability of the fill in between piles, semicircular jet grouting columns where executed in between them.

This project is unique in Chile, considering the application of the jet grouting technique combined with piling and it presents a new investigation lane regarding mixed retaining systems in deep excavations.

Keywords: retaining system, pile, jet grouting, anchors, filling

1 Introducción

Se presentan los aspectos relevantes de la entibación y las excavaciones del proyecto de subterráneos de dos edificios ubicados en Avenida Los Conquistados en la comuna de Providencia, Santiago, Chile. El proyecto llamado Nueva Santa María se emplaza entre el actual Hotel Sheraton y la Torre Santa María, por el nororiente y el surponiente respectivamente, y entre Avenida El Cerro y Avenida Los Conquistadores, por el norponiente y suroriente respectivamente. A continuación en la Fig. 1 se presenta una vista del emplazamiento de la obra.



Fig. 1 – Emplazamiento proyecto Nueva Santa María (Google Earth)

El sector presenta un relleno antrópico altamente heterogéneo hasta los 24m de profundidad. Bajo el relleno se encuentra la grava típica de Santiago.

La solución diseñada y ejecutada consistió en el uso de una pantalla de pilotes discontinuos, de 1m de diámetro espaciados cada 3m, y arriostrados con anclajes postensados. Estos anclajes se dispusieron con inclinaciones de hasta 45° y presentaron extensas longitud libre para que materialicen sus bulbos de reacción en el suelo natural consistente en la grava.

Inicialmente, para contener el suelo entre pilotes se planteó la ejecución de una pantalla de shotcrete tipo bóveda, que posteriormente se cambió a una forma plana tipo panel. Durante la excavación la

inestabilidad del relleno entre pilotes impidió ejecutar este refuerzo y finalmente se optó por la ejecución de columnas semicirculares de jet grouting entre los pilotes.

Otros desafíos importantes fueron dados por las condiciones de borde generadas por las altas cargas de los edificios vecinos y la interferencia que generan estas estructuras aledañas sobre la instalación de los anclajes.

La profundidad de excavación para los subterráneos fue variable según la zona en donde se emplazaba cada uno de los 2 edificios. El edificio sur (lado Avda. Los Conquistadores) presenta una altura de entibación de 27,0m aproximados para 8 subterráneos. Este sector se materializó con 5 líneas de anclajes postensados temporales a 45° respecto a la horizontal. El edificio norte (lado Avda. El Cerro) proyectado con 6 niveles de subterráneos presenta una altura de entibación de 23,0m aproximados y utilizó 4 líneas de anclajes postensados temporales a 45° respecto a la horizontal. La transición entre ambas excavaciones se resolvió por medio de un talud.

2 Información Geotécnica

En base a antecedentes históricos referentes a la explotación de las canteras de las laderas del cerro San Cristobal y a sus posteriores rehabilitaciones urbanas, es posible asumir que en el barrio de Pedro de Valdivia Norte y por lo tanto en la ubicación del proyecto, se encuentran superficialmente materiales remanentes de las faenas de estas antiguas canteras, además, de materiales provenientes de la excavación de la Línea 1 del Metro [1].

La campaña geotécnica consistió en 2 sondajes rotatorios y 2 zanjas exploratorias. Este conjunto identificó la gran heterogeneidad del relleno compuesto por una matriz de arena limosa y gravas de cantos angulares de tamaño máximo de 3" en estado suelto de humedad media a baja y con presencia aleatoria de bolsones de arenas, roca fracturada, bolones aislados de hasta 7", lentes de suelo fino de plasticidad nula y bloques de roca de hasta 1m de diámetro.

Adicional a lo anterior se realizaron mediciones de vibraciones de ondas de superficie, aplicando la metodología del ensayo SASW. Como resultado se asignó un valor conservador de velocidad de propagación de onda de corte de 250 m/s para el relleno antrópico y de 650 m/s para la grava natural a profundidad mayor a 24m [1].

Los parámetros geotécnicos fueron establecidos en el informe de mecánica de suelos del proyecto [1] según se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros geotécnicos del suelo.

Estrato	Profundidad (m)	γ (ton/m ³)	ϕ	c (ton/m ²)
Relleno antrópico	-24,0	1,9	34°	1,0
Grava de Santiago	≤ -40,0	2,2	43°	2,0

La selección de cohesión para el relleno antrópico estuvo ligado a un retroanálisis de los cortes de pendiente elevada de 8m de profundidad realizados en las zanjas de exploración. Las altas pendientes de hasta 80° demostraron una cohesión aparente, producto principalmente de la trabazón mecánica entre las partículas gruesas.

No obstante a lo anterior, una vez que se definió la utilización de una pantalla discontinua de pilotes anclados, la definición geotécnica y la heterogeneidad del suelo planteó la necesidad de considerar un refuerzo entre los pilotes para asegurar el efecto de arco y para mantener el suelo estable durante el proceso de excavación y construcción de los subterráneos.

3 Criterios adoptados para el diseño de la entibación

Los procedimientos de diseño de la entibación están documentados en [2] y se basaron en un conjunto de normas y recomendaciones de origen alemán ([3], [4], [5]) y en la normativa nacional vigente ([6], [7], [8]). La aplicación de las normas alemanas se limitaron a la definición de los parámetros específicos del diseño que no están definidos en la normativa nacional (coeficientes de seguridad para la falla de cuña profunda, factores de seguridad de falla a la resistencia pasiva del empotramiento, factores de seguridad y condiciones de fabricación de los anclajes, procedimientos de redistribución de tensiones en trasdós de la pantalla, procedimientos de tensado de los anclajes, etc).

La utilización de la normativa nacional aportó las definiciones de la condición sísmica de diseño, la definición de las sobrecargas por tránsito y por estructuras vecinas y las bases para el diseño del hormigón armado en general.

El coeficiente sísmico horizontal adoptado en el diseño consideró una diferenciación en la aceleración sísmica lateral para desplazamientos postsísmicos remanentes en los anclajes según lo permite la norma [6]. Para el sector de estructuras vecinas se consideró un desplazamiento postsismo de 5mm y para el sector de calles se admitió un desplazamiento postsismo de 20mm.

$k_h = 0,17g$ para zona de calles.

$k_h = 0,23g$ para zona de edificios.

El coeficiente sísmico vertical (k_v) se ha considerado cero.

Respecto a las sobrecargas de diseño, se trabajó con una sobrecarga de 1,2 ton/m² para la zona de calles y zonas sin construir, y de 1,1 ton/m² por cada piso para zona de edificaciones vecinas.

Las dimensiones del proyecto y la calidad geotécnica fueron claves para la definición del sistema de entibación seleccionado consistente en una pantalla discontinua de pilotes con anclajes postensados contra el terreno. Se utilizaron pilotes de 1m de diámetro con separación entre ejes de pilotes de 3m

considerando una pantalla de shotcrete estructural vinculada en toda la profundidad mediante barras ancladas a los pilotes. La cantidad de líneas de anclajes se definió según el cálculo y las capacidades máximas disponibles de los mismos.

En consideración de la gran heterogeneidad del relleno antrópico se definió como criterio de diseño que la totalidad de los bulbos inyectados de los anclajes postensados se desarrollaran en la grava natural. Para ello fue necesario aumentar las longitudes de los anclajes y las cargas de diseño. En definitiva se ejecutaron anclajes de hasta 180 toneladas de carga de servicio, entre los 35° y 45° de inclinación para alcanzar el estrato deseado.

En consideración de la alta componente de carga vertical que transmitían los anclajes a los pilotes, también fue necesario verificar los empotramientos de los pilotes para evitar asentamientos en ellos.

4 Aspectos constructivos durante la ejecución de las obras de entibación

La construcción de los pilotes de hormigón armado no presentó ningún tipo de inconvenientes. El proyecto consideró la ejecución de un total de 4.470 metros lineales de pilotes de 1m de diámetro perforados mediante encamisado recuperable (ver Fig. 2). La longitud de pilote individual máxima fue de 38,7m.

Respecto a los anclajes postensados, se ejecutaron casi 12.000 metros lineales de anclajes postensados de entre las 90 y 180 toneladas de carga de servicio con una longitud promedio de 22,9m, alcanzando una longitud máxima de perforación de 36,0m. Esta longitud de anclaje fue inédito para proyectos de entibación en la ciudad de Santiago.

La ejecución de anclajes presentó desafíos importantes, considerando que debían perforarse con un ángulo entre 35° y 45° respecto a la horizontal, atravesando un potente estrato de relleno heterogéneo para alojar el bulbo resistencia en la grava natural. Además, la gran deformación de la longitud libre debió prever un procedimiento de tensado especial para la utilización de los actuadores hidráulicos disponibles en el país para salvar la deformación máxima que stos admitían. En la Fig. 3 se muestra un corte típico del sector con 5 líneas de anclajes y la ejecución de los anclajes.

Otra complicación ocurrida en la faena de anclajes tiene relación con la fricción que se desarrolló en la longitud libre de los anclajes en su contacto con el terreno de relleno heterogéneo. La alta fricción detectada durante los ensayos de aceptación de cada anclaje reflejaron altas deformaciones remanentes a un ciclo de carga y descarga obligando a realizar ensayos de carga extendidos para verificar comportamientos repetitivos y descartar efectos adversos o aleatorios sobre la entibación. Esto mismo motivó a la utilización de celdas de carga para verificar que no generaran pérdidas de carga durante la vida útil de la entibación.



Fig. 2 – Faena de perforación y ejecución de pilotes (Pilotes Terratest S.A.)

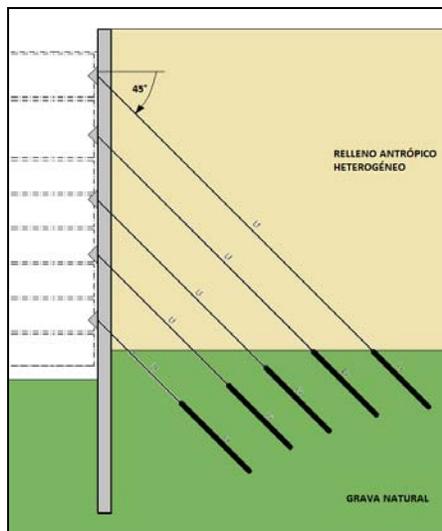


Fig. 3 – Corte esquemático con 5 líneas de anclajes y ejecución de perforaciones para la instalación de los anclajes postensados.

5 Inestabilidad del suelo entre pilotes y Ejecución de Jet Grouting

El uso del jet grouting surgió durante la ejecución de la obra, en respuesta a problemas de estabilidad local en el relleno durante la instalación del refuerzo original considerado entre pilotes.

El refuerzo original consistía en una pantalla de shotcrete que desarrollaba una bóveda para asegurar la contención del terreno mediante la compresión del shotcrete. Posteriormente, se cambió la solución a una pantalla plana de shotcrete estructural reforzado con una malla simple tipo ACMA que se vinculaba a los pilotes mediante dowells. La ejecución de este refuerzo se proyectó de manera secuencial, excavando en una altura reducida en donde el suelo se mantuviera estable, para luego colocar la malla y el hormigón proyectado.

Durante las excavaciones se encontró una gran heterogeneidad del terreno y a poca profundidad se evidenciaron zonas en donde no había presencia de material fino y en donde se produjeron de manera puntual algunas inestabilidades locales entre pilotes. Estas condiciones obligaron a disminuir cada vez más la altura de excavación para la ejecución del shotcrete hasta el punto en que el bajo rendimiento de excavación se hizo insostenible para el programa de obra. Con la pantalla realizada ya no era posible de volver al diseño de shotcrete tipo bóveda y por lo tanto se abrió la posibilidad de emplear el Jet Grouting para realizar un tratamiento entre pilotes previo a la realización del resto de la excavación.

La técnica del Jet Grouting consiste en la ejecución de una pequeña perforación hasta la profundidad de diseño, para luego inyectar a alta presión lechada de cemento mediante el ascenso y rotación de la varilla de perforación, logrando pseudo columnas (circulares, semicirculares o tipo panel) de una combinación de suelo y cemento (ver Fig. 4).

Con la versatilidad de esta técnica se pudo ejecutar un refuerzo semicircular entre pilotes, sin necesidad de excavar y descubrir el relleno. Como parte de la excavación ya estaba materializada, la plataforma de ejecución obligó a realizar las columnas semicirculares de Jet Grouting con una pequeña inclinación respecto a la vertical.

El diseño del mejoramiento mediante Jet Grouting se limitó a exigir una resistencia mínima que asegure su integridad y en asegurar que el área a tratar quede adecuadamente inyectada para transmitir por fricción las cargas desde el pilote al suelo en trasdós sin producir planos de fracturas preferenciales asegurando el efecto de arco. Las profundidades y dimensiones del suelo necesario a tratar fueron estimadas a partir de modelos simples de deslizamiento de cuñas 3D estimadas según las geometrías de la zona de desconfinamiento que se obtuvieron de modelos en elementos finitos (Ver Fig.5).

Antes de la ejecución de las columnas semicirculares de Jet Grouting se realizaron pruebas de inyección regulando los parámetros de presión, de velocidad y de diámetro de tobera de inyección para fijar la metodología con la cual finalmente la ejecución del Jet Grouting cumplió con las exigencias establecidas en el diseño referentes a la geometría y resistencia. En la Fig. 6 se presentan algunas fotografías del tratamiento de Jet Grouting terminado.

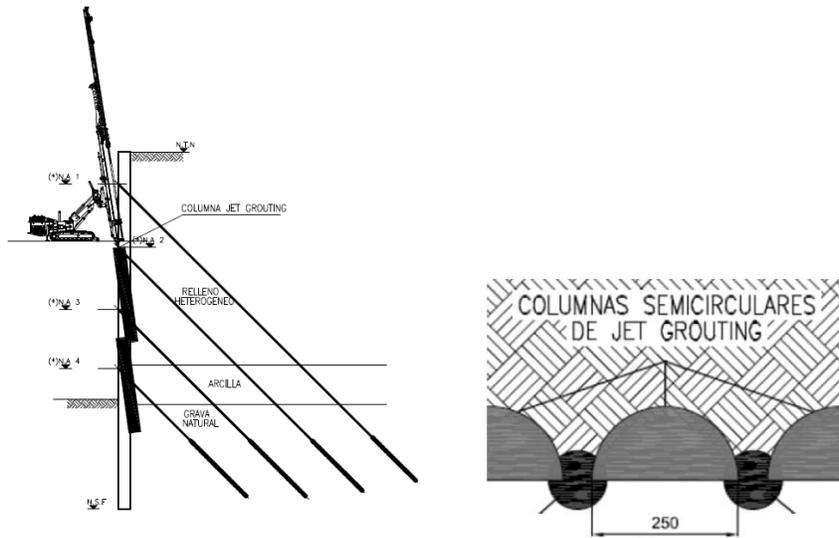


Fig. 4 – Esquema de ejecución de Jet Grouting (izq.: corte y der.: vista en planta)

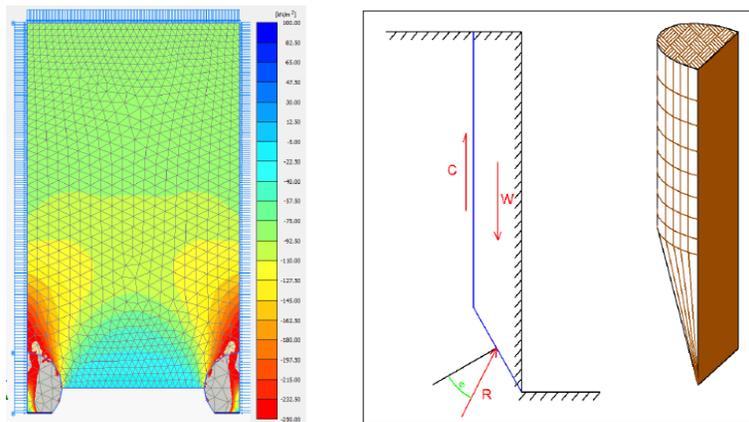


Fig. 5 – Modelos de análisis de la geometría de falla del suelo entre pilotes



Fig. 6 – Ejecución de Jet Grouting y vista del refuerzo terminado

6 Instrumentación y monitoreo

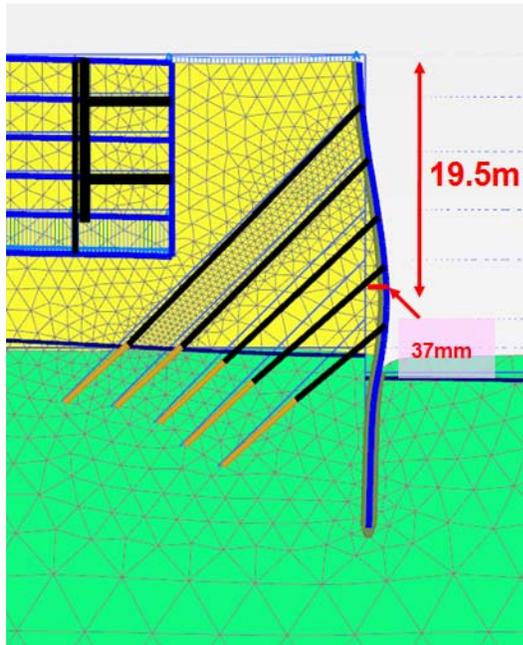
Durante el proceso de excavación, se llevó a cabo una campaña de instrumentación y monitoreo que incluyó la instalación de 12 celdas de cargas en anclajes (ver Fig.7) y 3 tuberías inclinométricas en 3 pilotes: Avenida Los Conquistadores, Calle Josefina Edwards/Hotel Sheraton y Avenida El Cerro.



Fig. 7 – Celda de carga en anclaje de 9 cables

El monitoreo de las celdas y de los inclinómetros arrojó resultados satisfactorios, que lograron concluir lo siguiente:

- Los anclajes no estuvieron afectos a pérdidas de carga durante la vida útil de la entibación temporal
- Los análisis de deformaciones realizados en PLAXIS 2D con los parámetros de deformación estimados a partir de las velocidades de propagación de ondas sobreestimaron las deformaciones. En la Fig.9 se observa uno de los modelos de análisis que estimó una deformación máxima de 37mm mientras que las mediciones obtenidas en la misma sección no superaron los 10mm de deformación.
- Los esfuerzos internos dentro del pilote se mantuvieron dentro de un rango admisible y con niveles de sollicitación menores a los estimados en la etapa de diseño.



Desviaciones acumuladas EJE A [mm]

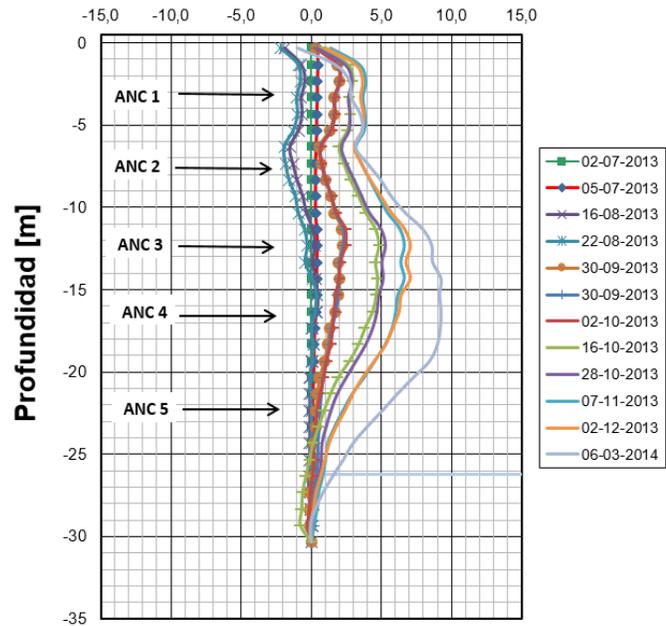


Fig. 9 – Análisis predictivo con PLAXIS 2D y resultados del Monitoreo



Fig. 10 – Fotografía de la obra panorámica (Pilotes Terratest S.A.)

7 Conclusiones

Las entibaciones verticales en rellenos antrópicos heterogéneos representan situaciones con complicaciones importantes que deben ser atendidas para evitar los riesgos de inestabilidades durante las excavaciones.

La solución para la entibación de los subterráneos de dos edificios ubicados en Avenida Los Conquistadores en la comuna de Providencia, en Santiago fue inédito en Chile por el uso de Jet

Grouting para estabilizar el terreno entre los pilotes de la pantalla discontinua de la entibación. Este proyecto presentó la particularidad de emplazarse en una zona en donde se presenta un potente estrato de relleno antrópico altamente heterogéneo, llegando hasta los 24 metros de profundidad apoyado sobre la grava típica de Santiago.

En definitiva se concluye que en condiciones de suelos conformados por rellenos antrópicos heterogéneos en donde se proyecte una entibación en base a pantallas de pilotes discontinuos, es desaconsejada la realización de un refuerzo entre pilotes mediante shotcrete estructural. A su vez, en el caso histórico presentado se confirma que la utilización de Jet Grouting para la estabilización de esta zona resulta como una opción exitosa en términos técnicos y económicos con la particularidad de resultar ser una solución con una alta velocidad de ejecución en obra. De hecho, se destaca que el uso exhibido aquí del Jet Grouting representa ventajas económicas y constructivas importantes frente a otras alternativas seguras y posibles para este tipo de obras como es la realización de pantallas continuas de pilotes secantes o de pared moldeada (en donde el material se pueda excavar con cuchara).

Respecto a la instrumentación empleada, esta permitió validar las hipótesis de diseño dando la seguridad de que la entibación de suelos en condiciones excepcionales se comportó en conformidad a su diseño. Bajo estas condiciones excepcionales siempre es recomendable contemplar el uso de instrumentación para controlar la seguridad en las excavaciones.

Referencias

- [1] CMGI. *“Informe Geotécnico de Avance, Estabilización de Excavación Profunda Subterráneos Edificios Nueva Santa María”*. Revisión A; 04/07/2012.
- [2] Pilotes Terratest S.A. Memoria de Cálculo Proyecto de Entibación Edificios Nueva Santa María. Revisión A; 29/10/2012.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 4085:2011-05 Baugrund – Berechnung des Erddrucks. Mai 2011.
- [4] Technical Committee CEN/TC 288, Normenausschuss Bauwesen. DIN EN 1537:2013-09 Execution of special geotechnical works – Ground anchors. September 2013.
- [5] DGGT. Recommendations on Excavations EAB. Ernst & Sohn, 3rd Edition, December 2013.
- [6] NCh3206. Of2010. “Geotécnia – Excavaciones, entibaciones y Socalzados - Requisitos”. 2010.
- [7] NCh3171. Of.2010 “Diseño Estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga”
- [8] ACI-318-11 - Building code requirements for structural concrete, ACI Committee 318, 2011.