

## DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN EN ENTIBACIÓN MEDIANTE PILOTES ANCLADOS EN LA GRAVA DE SANTIAGO

Sebastián Boldrini L.

*Gerente de Proyectos Especiales, Pilotes Terratest S.A.*

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

Freddy López L.

*Ingeniero de Proyectos, Pilotes Terratest S.A.*

*flopez@terratest.cl - Alonso de Córdova 5151 Of. 1401, Las Condes - Santiago*

### **Resumen**

El sistema de muros discontinuos de pilotes de H<sup>°</sup>A<sup>°</sup> arriostrados lateralmente mediante anclajes postensados representa el sistema típico de entibación para el sostenimiento temporal de las excavaciones desarrolladas en el suelo de Santiago.

En el presente trabajo se presenta un caso histórico de una entibación tradicional en la "Grava de Santiago" para una excavación de 21m de profundidad, en el cual se comparan los modelos de diseño utilizados en la Ingeniería práctica con los resultados obtenidos mediante el monitoreo geotécnico de una sección típica, consistente en mediciones inclinométricas y de celdas de carga en cada nivel de anclaje.

El trabajo se centra en hacer un resumen de las consideraciones normativas utilizadas en el diseño de este proyecto que incluyen interpretaciones de normas extranjeras al diseño de este tipo de sostenimiento.

*Palabras-Clave: entibación, pilotes, anclajes postensados, Grava de Santiago, monitoreo geotécnico*

### **Abstract**

The typical retaining wall system used to secure the excavations carried out in Santiago corresponds to a contiguous wall consisting on reinforced concrete piles, laterally braced with prestressed anchors.

This paper presents a traditional contiguous wall system designed for a 21m-deep excavation in the "Santiago Gravel", and compares the results of the design models with the results of the geotechnical monitoring carried out in the construction site for a typical section, consisting on inclinometer and anchor load measurements.

*Keywords: retaining wall, piles, prestressed anchors, Santiago Gravel, geotechnical monitoring*

## 1 Introducción

La excavación del Edificio de Oficinas Parque Oriente, ubicada en la intersección de la Avenida Alonso de Córdova y la calle Cerro El Plomo (Fig. 1), tiene una profundidad aproximada de 21.2m respecto del terreno natural en la zona de los muros perimetrales.



Fig. 1– Ubicación de la excavación

El sistema de entibación diseñado para garantizar la seguridad de la excavación está compuesto por pilotes de H<sup>A</sup>° (D = 0.88m), con una separación máxima entre ejes de 3.2m y arriostrados lateralmente por un máximo de 3 líneas de anclajes postensados temporales (Fig. 2).

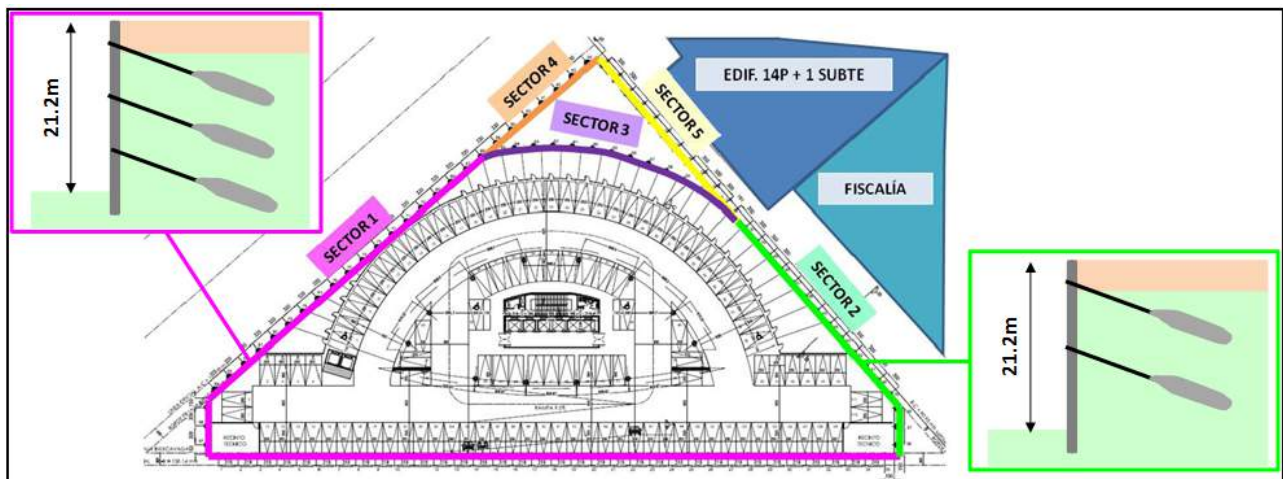


Fig. 2– Sistema de entibación

**VIII CONGRESO CHILENO DE  
INGENIERÍA GEOTÉCNICA 2014**



ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

*26 al 28 de Noviembre de 2014*  
*[www.sochige2014.cl](http://www.sochige2014.cl)*

## 2 Criterios de Diseño

### 2.1 Parámetros Geotécnicos

Para el dimensionamiento del sistema de entibación se han considerado los siguientes parámetros geotécnicos, correspondientes a la unidad denominada "Ripio del Mapocho" (Grava de Santiago):

Tabla 1 – Parámetros Geotécnicos para la Grava de Santiago [1]

Estrato	Profundidad (m)	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (°)	$c'$ (ton/m <sup>2</sup> )	Es (ton/m <sup>2</sup> )
Grava 2 <sup>da</sup> dep.	0.0 - 5.0	2.2	45	1.5	0 - 1.1x10 <sup>4</sup>
Grava 1 <sup>ra</sup> dep.	5.0 - 25.0	2.3	45	2.5	1.4x10 <sup>4</sup> - 3.4x10 <sup>4</sup>

No se ha considerado la presencia de napa freática dentro de la altura de influencia del proyecto.

### 2.2 Método de cálculo

El diseño de la entibación se realizó con el software GGU-RETAIN de origen alemán, cuyos procedimientos de diseño y verificación de sistemas de entibación están basados en las normas alemanas DIN[2],[3],[4], [5], [6], [7], así como las recomendaciones de los Comités de Trabajo para Excavaciones [8] y de Estructuras Portuarias [9] de las Sociedad Alemana de Geotecnia (DGGT).

Los empujes actuantes sobre la entibación (activos y pasivos) se calcularon en base a la Norma DIN 4085 [6], adoptando la redistribución de empujes recomendada en la EAB [8].

En la Tabla 2 se resumen las consideraciones de diseño:

Tabla 2 – Consideraciones de diseño por sector

Sector	Empuje Activo de Diseño $e_{a,calc}$		Coef. sísmico según [10]		Empuje Pasivo de Diseño $e_{p,calc}$		Sobrecarga según [10] (ton/m <sup>2</sup> )
	Caso Estático	Caso Sísmico	$k_h/g$ (-)	$\Delta_{eq}$ (mm)	Caso Estático	Caso Sísmico	
Zona de calles	$e_a$	$e_{as}$	0.15	20.0	$e_p/2.5$	$e_p/2.0$	1.2
Zona con edif. vecinos	$e_{ao} = 0.5e_a + 0.5e_o$	$e_{as}$	0.22	5.0			1.1 (p/piso)

$e_a$	empuje activo
$e_{a0}$	empuje activo incrementado
$e_o$	empuje en reposo
$k_h/g$	coeficiente sísmico horizontal
$\Delta_{eq}$	desplazamiento post sismo
$e_p$	empuje pasivo según [6]

En base a estos criterios se analizan las etapas constructivas de la excavación para obtener las cargas y longitudes de anclajes, así como los esfuerzos internos sobre los pilotes de Hormigón Armado, para su dimensionamiento conforme al código ACI 318 [11].

En la Fig. 3 se presentan los modelos de cálculo de una sección típica de estudio, ubicada en el sector de calles, para las etapas constructivas definidas en la Tabla 3.

Tabla 3 – Etapas constructivas críticas de la excavación

Etapa	Excavación	Cota bajo NTN	Anclajes
1	Hasta nivel de 1 <sup>ra</sup> línea de anclajes	-5.0	1 <sup>ra</sup> línea de anclajes ejecutada
2	Hasta nivel de 2 <sup>da</sup> línea de anclajes	-13.5	1 <sup>ra</sup> línea de anclajes tensada, 2 <sup>da</sup> línea de anclajes ejecutada
3	Hasta nivel de sello de excavación	-21.2	1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> líneas de anclajes tensadas

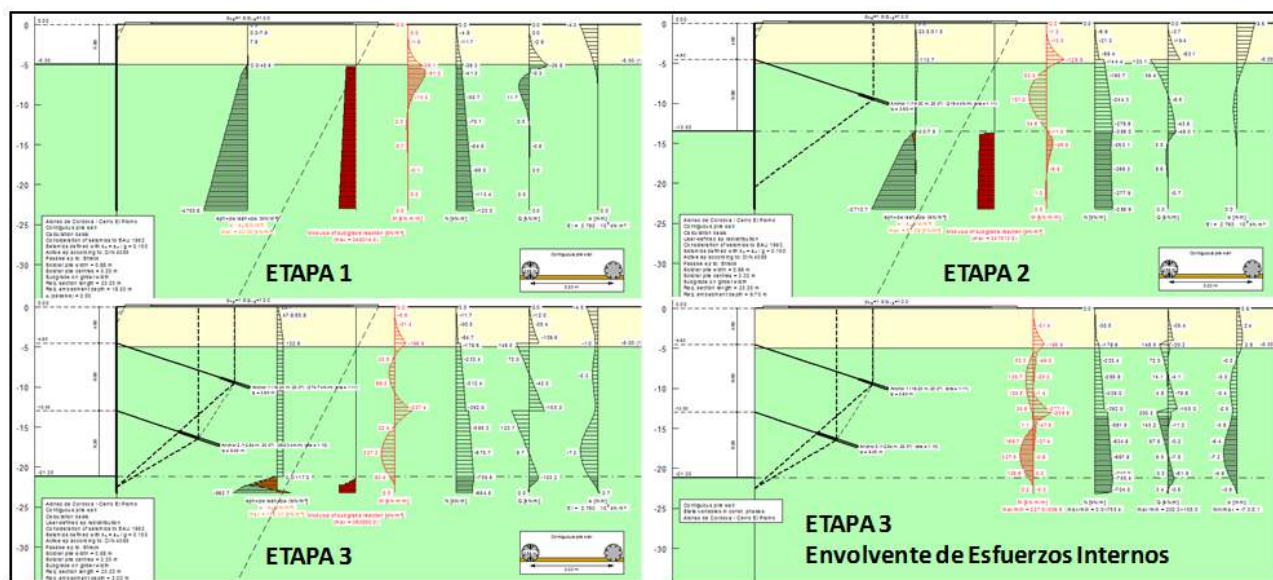


Fig. 3– Modelos de cálculo para el sector de calles (caso sísmico)

En la Tabla 4 se resume el dimensionamiento de los pilotes de la sección de estudio:

Tabla 4 – Pilotes de entibación (sector de calles)

Diámetro (m)	Longitud (m)	Empotra- miento (m)	Separación entre ejes (m)	Hormigón Armado		Armadura de refuerzo		
				Hormigón	Acero	Long.	Transversal	
							Apoyos	Tramos
0.88	23.2	2.0	3.2	H30	A63-42H	16Φ22	ZΦ16@15	ZΦ12@20

En la Tabla 5 se resume el dimensionamiento de los anclajes de la sección de estudio:

Tabla 5 – Anclajes postensados (sector de calles)

Línea de anclaje	Cota bajo NTN	Longitud		Inclinación (°)	Carga de Anclaje (ton)	Cables	
		libre (m)	bulbo (m)			Diámetro	Cantidad
1 <sup>ra</sup>	-4.5	12.6	3.6	20	88.0	0.6" (15.24mm)	6
2 <sup>da</sup>	-13.0	7.5	5.0	20	124.5	0.6" (15.24mm)	8

### 3 Estimación de desplazamientos

Para la estimación de los desplazamientos esperados para la sección de estudio en el caso estático, se llevó a cabo un análisis mediante elementos finitos con el software PLAXIS 2D, considerando el modelo constitutivo elastoplástico *Hardening Soil* [12].

En la Tabla 6 se resumen los parámetros geotécnicos utilizados para la modelación. Se adoptaron los parámetros de resistencia al corte resumidos en la Tabla 1 y los parámetros de deformación propuestos en [13] para la Grava de Santiago:

Tabla 6 – Parámetros Geotécnicos para el modelo *Hardening Soil* para la Grava de Santiago

Estrato	Profundidad (m)	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (°)	$c'$ (ton/m <sup>2</sup> )	$\psi$ (°)	$E_{50}^{ref}$ (ton/m <sup>2</sup> )	$E_{ur}^{ref}$ (ton/m <sup>2</sup> )	$v'_{ur}$ (-)	$m$ (-)	$P_{ref}$ (ton/m <sup>2</sup> )
Grava 2 <sup>da</sup> dep.	0.0 -5.0	2.3	45	1.5	15	$1.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$	0.2	0.57	10
Grava 1 <sup>ra</sup> dep.	5.0 - 25.0	2.3	45	2.5	15	$1.5 \times 10^4$	$4.5 \times 10^4$	0.2	0.57	10

La entibación se modeló como utilizando un elemento vertical elástico tipo “*frame*” con rigidez axial (EA) y flexural (EI) determinada por la geometría de la sección circular del pilote. A su vez los anclajes se simulaban como elementos axiales elásticos vinculados al pilote y anclados en una longitud de bulbo simulada mediante un elemento “tipo geomalla”. La rigidez axial (EA) de los anclajes se definió por el tipo y número de cables que lo conforman, mientras que la rigidez axial del bulbo se definió como el de un elemento inyectado de sección circular dado por el diámetro de perforación del anclaje. Para efectos de la modelación 2D, todas las rigideces se dividieron por el ancho tributario de cada elemento correspondiente a la separación entre pilotes  $L_{spacing} = 3.2m$ .

En la Tabla 7 se resumen los valores de los parámetros elásticos indicados.

Los resultados del análisis muestran que se espera un desplazamiento horizontal del coronamiento de la entibación de aprox. 10mm cuando se alcance el nivel final de excavación, es decir 21.2m bajo el nivel de terreno natural (NTN), sin embargo, el desplazamiento horizontal máximo de la entibación ocurriría a una profundidad comprendida entre 8 y 18m bajo el NTN, con una magnitud de aproximada de 14mm.

Tabla 7 – Parámetros resistentes para los elementos estructurales

Elemento	Tipo	Material	EA (ton/m)	EI (ton*m <sup>2</sup> /m)	$\nu$ (-)	L <sub>spacing</sub> (m)
Pilote (D=0.88m)	<i>Plate</i>	elástico	4.2x10 <sup>5</sup>	2.5x10 <sup>4</sup>	0.25	3.2
Anclaje 1 <sup>ra</sup> línea (6 cables de 0.6")	<i>Anchor</i>	elástico	5.1X10 <sup>3</sup>	-	-	3.2
Anclaje 2 <sup>da</sup> línea (8 cables de 0.6")	<i>Anchor</i>	elástico	6.8X10 <sup>3</sup>	-	-	3.2

En la Fig. 4 se muestran los desplazamientos esperados para las etapas constructivas críticas de la excavación, definidas en la Tabla 3.



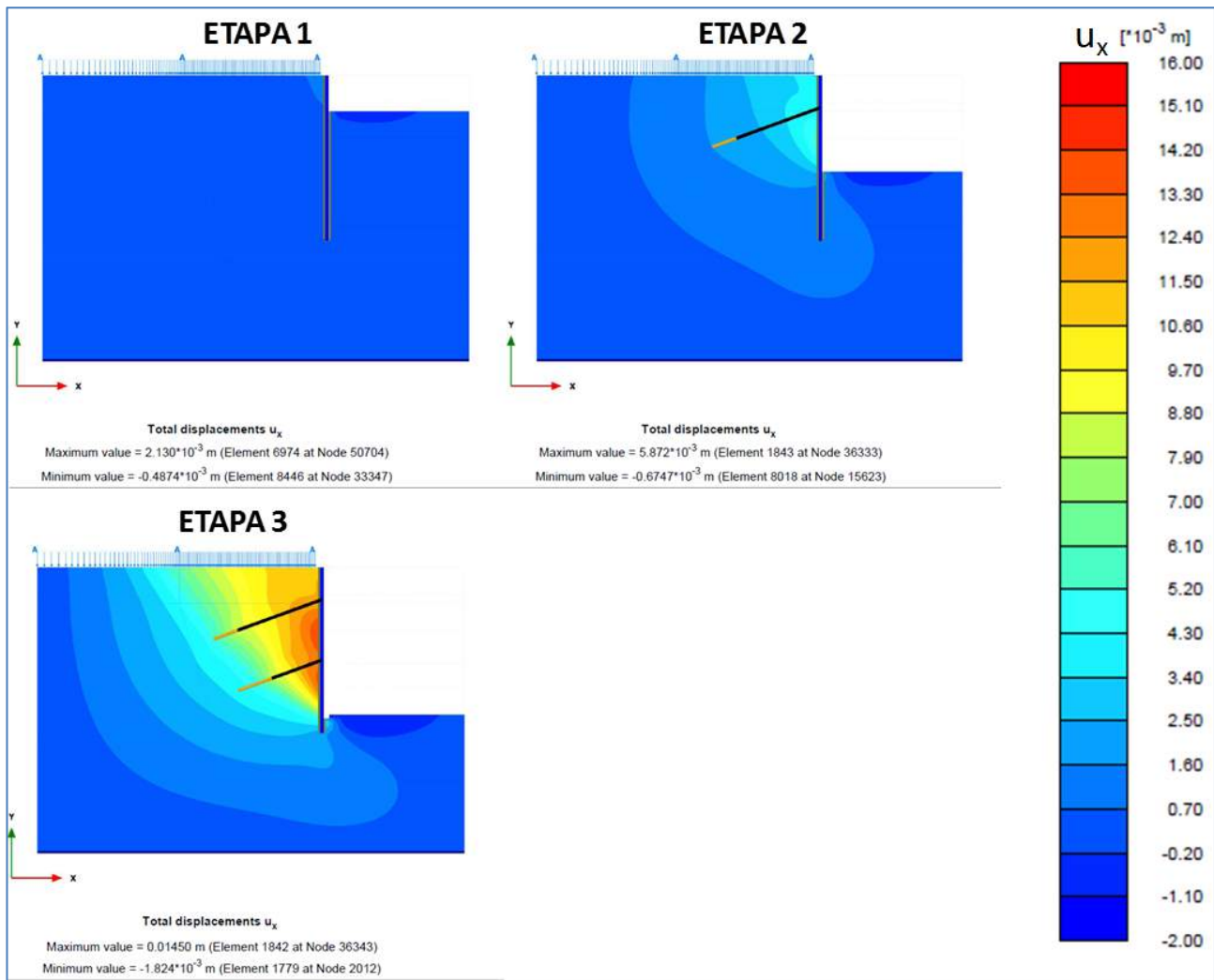


Fig. 4– Desplazamientos esperados para el sector de calles (caso estático)

#### 4 Monitoreo Geotécnico

El control del comportamiento real de la entibación se realizó instrumentando un pilote representativo de la sección de estudio con un tubo inclinométrico y con celdas de carga para medir la fuerza en los dos anclajes (ver Fig. 5).

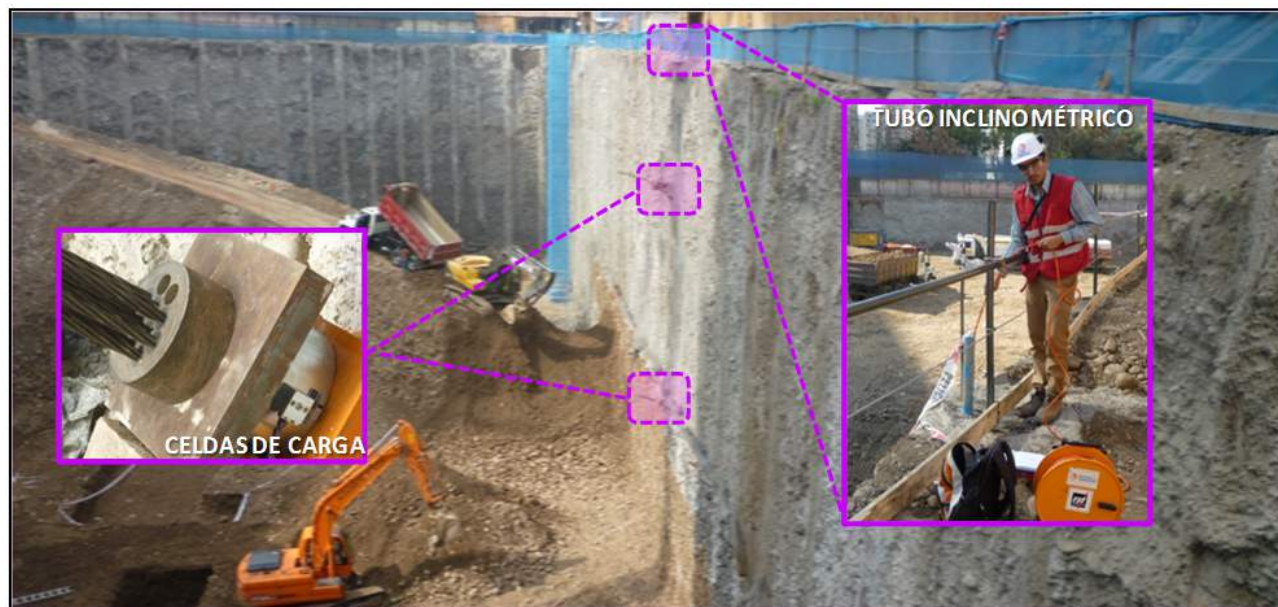


Fig. 5– Instrumentación geotécnica Pilote 13 (Sector Calles)

Para la condición final de excavación (21.2m bajo NTN) se registró un desplazamiento horizontal del coronamiento del pilote de 11mm. El desplazamiento horizontal máximo registrado fue de aprox. 15mm a una profundidad de 8.5m bajo NTN. En la Fig. 6 se presentan los registros de las mediciones inclinométricas realizadas.

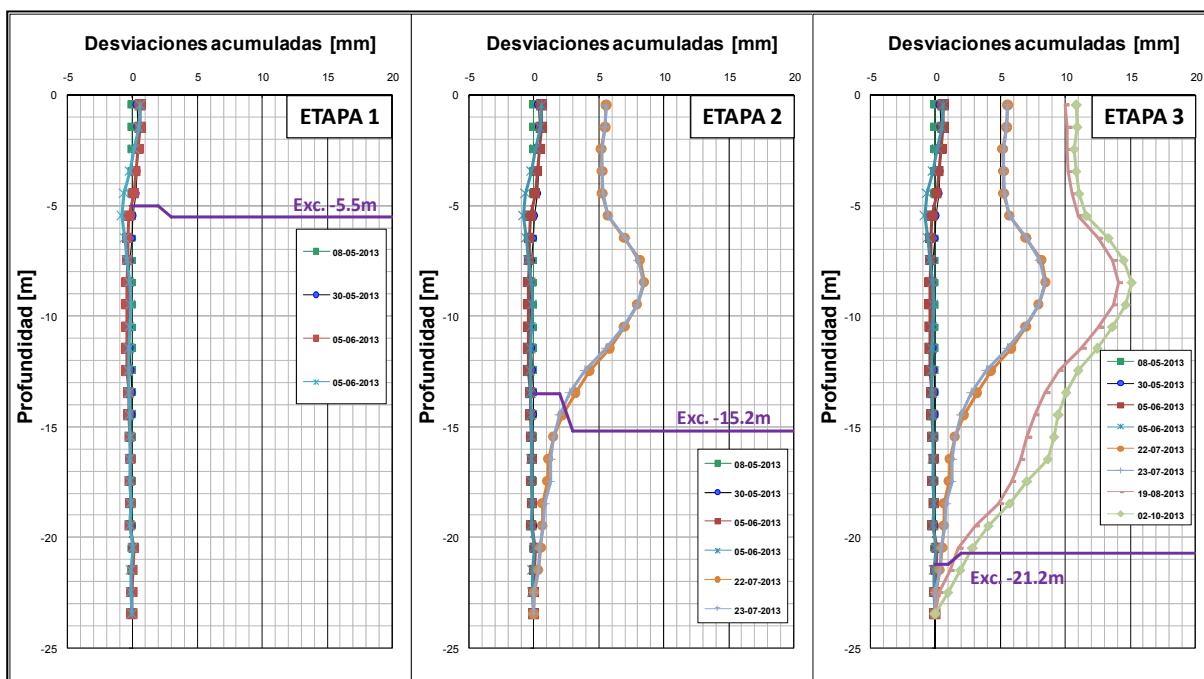


Fig. 6– Control de desplazamientos horizontales Pilote 13 (Sector Calles)

En la Fig. 7 se presentan los resultados de las mediciones de fuerza de anclajes realizadas con las celdas de carga.

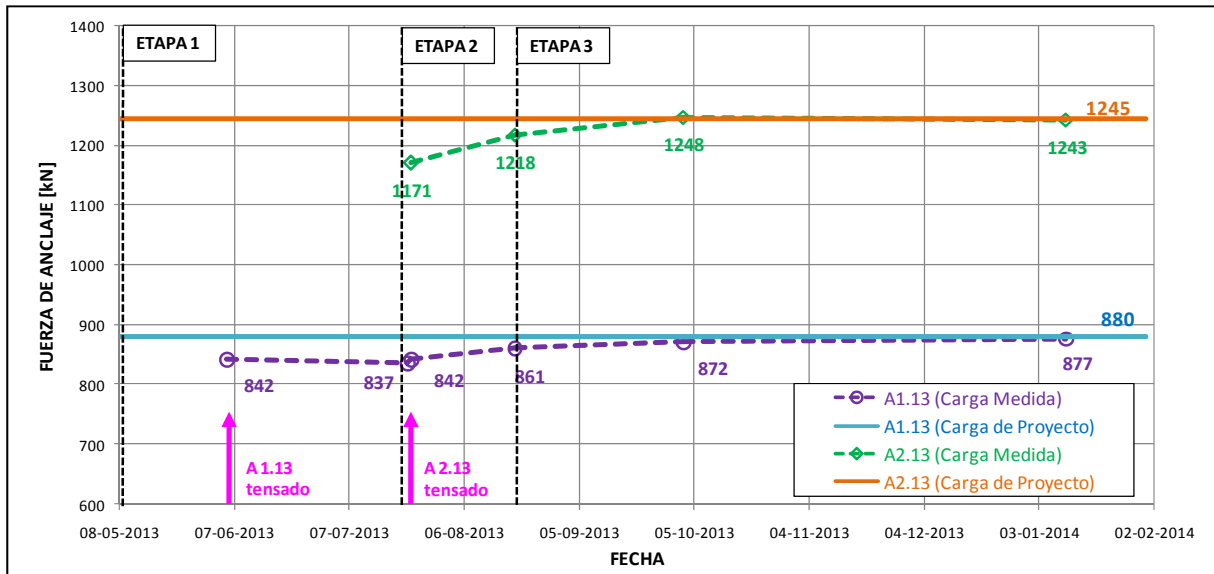


Fig. 7– Medición de fuerza de anclajes Pilote 13 (Sector Calles)

### 5 Análisis de resultados y conclusiones

Al comparar lo estimado y lo medido que se presenta en la Fig. 8, se concluye que la modelación 2D con modelo de endurecimiento del tipo *Hardening Soil* permitió estimar deformaciones estáticas cercanas a las reales.

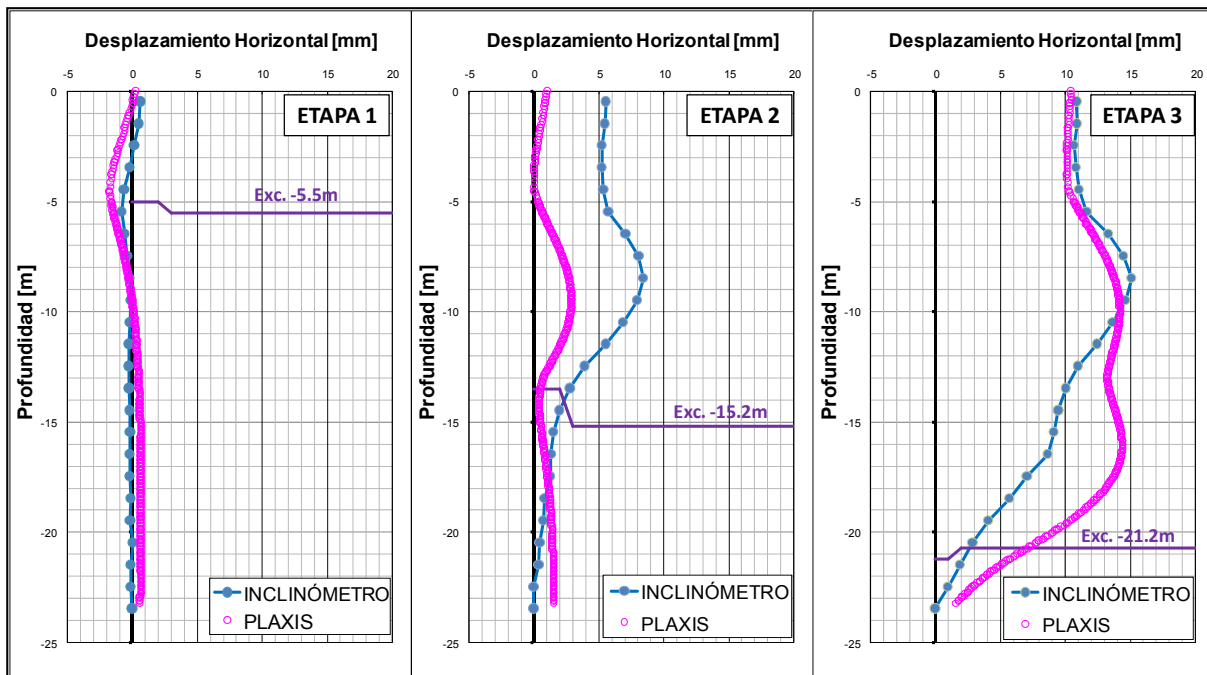


Fig. 8– Comparación de los resultados para la sección de estudio

El desplazamiento horizontal máximo medido fue de  $\Delta \approx 15\text{mm}$  para una altura de excavación  $H = 21.2\text{m}$ , correspondiente a un desplazamiento normalizado de la entibación  $\Delta/H \approx 7 \times 10^{-4}$ , con lo cual se pudo verificar que se alcanzó la condición activa (mínimo empuje) para la Grava de Santiago [14].

Respecto a la carga de los anclajes instalados, se pudo evidenciar una diferencia del orden del 6% entre la carga de proyecto y la carga efectiva de los anclajes después del bloqueo. Esta diferencia es esperable porque la carga de bloqueo se basa en una estimación de la deformación del reacomodo de los elementos de la cabeza del anclaje (cuñas, placa de reacción, pilote, etc.).

La deformación del sistema de entibación, posterior a la puesta en servicio de los anclajes, fue progresivamente aumentando la carga en estos elementos. Finalmente, cuando la excavación llegó a su nivel definitivo, la carga de los anclajes alcanzó el nivel de carga previsto originalmente.

## 6 Perspectivas

Los resultados del monitoreo geotécnico realizado permiten validar las consideraciones adoptadas para el diseño del sistema de entibación, verificándose satisfactoriamente la estabilidad de la excavación bajo niveles aceptables de deformación.

A pesar de la buena correlación entre los desplazamientos estimados con los desplazamientos efectivamente registrados, existen notorias diferencias, principalmente evidenciadas en las etapas constructivas. Aunque la herramienta de análisis 2D permitió obtener una buena estimación, se

espera en un futuro revisar los parámetros constitutivos del modelo de manera de ir mejorando en el tiempo las estimaciones realizadas con este método.

Adicional a lo anterior, es posible plantear realizar una revisión de las distribuciones de empujes que ocurren detrás del pilote de manera de verificar si las redistribuciones propuestas por la normativa alemana y la normativa chilena [10] son adecuadas para los modelos de diseño utilizados en la ingeniería práctica.

La comparativa entre los esfuerzos internos obtenidos con el método de elementos finitos y con el método de diseño práctico en base a la definición de empujes realizado con el software GGU-RETAIN demostró una muy buena similitud con excepción a la concentración de esfuerzos que ocurre en el empotramiento, en donde los modelos en PLAXIS 2D sugieren la ocurrencia de esfuerzos internos mayores.

Los puntos planteados tienen directa relación con los esfuerzos internos reales a los que están sujetos los elementos estructurales (pilotes de entibación) y en consecuencia, con su dimensionamiento.

En este sentido, la implementación del monitoreo geotécnico resulta de mucha utilidad, pues permite comprender mejor los mecanismos reales que tienen lugar en los sistemas de entibación de excavaciones profundas, permitiendo calibrar los parámetros adoptados para los modelos de cálculo empleados en la Ingeniería Geotécnica práctica, con lo cual se pueden realizar estimaciones más precisas del comportamiento de las estructuras analizadas, reduciendo la incertidumbre que rodea la determinación de los parámetros que gobiernan su dimensionamiento y manteniendo durante el avance de la excavación un control que de seguridad y garantías de que los elementos se comportan según fueron diseñados.

Es de interés plantear que actualmente en Chile el uso de instrumentación geotécnica no es exigida a nivel normativo y las excavaciones para edificaciones en general nunca contemplan este tipo de control sin importar las estructuras cercanas ni las profundidades de excavación que han ido en aumento en el tiempo. Este caso fue totalmente financiado por PILOTES TERRATEST con fines de investigación.

## Referencias

- [1] Ortigosa P, Musante H, Kort I. *Mechanical Properties of the Gravel of Santiago for Static and Dynamic Loading Conditions*. X Congreso Mundial de Mecánica de Suelos. Stockholm; 1981.
- [2] DIN 1054: *Zulässige Belastung des Baugrunds*; 1976.
- [3] DIN1054:2010-12: *Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*; 2010
- [4] DIN 4014: *Bohrpfähle: Herstellung, Bemessung und Tragverhalten*; 1990.

- [5] DIN 4084: *Gelände- und Böschungsbruchberechnungen*; 1981.
- [6] DIN 4085: *Berechnung des Erddrucks*; 1987.
- [7] DIN 4125: *Verpressanker: Kurzzeitanker und Daueranker; Bemessung, Ausführung und Prüfung*; 1990.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. *Empfehlungen des Arbeitskreises BaugrubenEAB*; 4<sup>a</sup> ed. Berlin: Ernst & Sohn; 2006.
- [9] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. *Empfehlungen des Arbeitskreises UfereinfassungenEAU*; 9<sup>a</sup> ed.; Berlin: Ernst & Sohn; 1996.
- [10] NCh3206.Of2010: *Geotecnia - Excavaciones, entibaciones y socializados - Requisitos*; 2010.
- [11] ACI 318-08: *Building code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, 2008
- [12] Schanz T, Vermeer P, Bonnier P. *The Hardening Soil Model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 years of PLAXIS*; Rotterdam: Ed. Balkema; 1999.
- [13] Bard E, León R, Anabalón M. *Análisis Dinámico de Túneles en las Gravas de Santiago Parte I: Análisis de la Respuesta Dinámica de las Gravas*. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Santiago; 2004.
- [14] Ortigosa P. *Entibaciones en Grava*. Seminario Internacional Pasado, Presente y Futuro de la Geotecnia. Lima; 2001.