



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO GEOTÉCNICO -  
ESTRUCTURAL EN PIQUES CIRCULARES DURANTE LA CONSTRUCCIÓN  
DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE SANTIAGO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MACARENA PAZ LÓPEZ GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:  
ROBERTO GESCHE SCHULER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CÉSAR PASTÉN PUCHI  
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con  
mención en Estructuras, Construcción y  
Geotecnia.  
**POR:** Macarena Paz López González  
**FECHA:** 12/07/2014  
**PROFESOR GUÍA:** Roberto Gesche Schuler

**ESTUDIO DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO GEOTÉCNICO - ESTRUCTURAL  
EN PIQUES CIRCULARES DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL  
METRO DE SANTIAGO.**

Este trabajo estudia el plan de monitoreo geotécnico y estructural implementado durante la construcción de dos piques circulares de la Línea 3 del Metro de Santiago. El plan de monitoreo utiliza instrumentos tales como celdas de presión, strain meters, prismas de medición de convergencia y teodolitos ópticos electrónicos de alta precisión, con los que se obtienen registros de presiones del suelo sobre el manto del pique, tensiones en el hormigón y deformaciones al interior del pique, respectivamente.

Los piques están localizados en distintos suelos. El pique El Cortijo está emplazado en la comuna de Conchalí en suelo fino, posee un diámetro de 15 m y una profundidad final de 33 m. El pique Plaza Chacabuco se ubica en la comuna de Independencia en suelo grueso, posee un diámetro de 25 m y una profundidad final de 28,3 m. En la interpretación de las lecturas obtenidas se observan, para algunos casos, resultados distintos a los esperados teóricamente según proyecto. La relación que habría entre las lecturas y las actividades constructivas desarrolladas durante el monitoreo son esenciales para lograr dar una interpretación adecuada a la evolución de las tensiones y deformaciones.

De éste trabajo se obtienen lecciones respecto a la implementación de un proyecto de instrumentación, el plan de monitoreo, la interpretación de las lecturas obtenidas y el valor de éste para lograr obras más seguras y diseños más eficientes.

*Para las personas que más amo en la vida, los seres más esforzados y dedicados que conozco...que han dado todo por mí y mis hermanos. Esto es para ustedes.*

*Papá y Mamá.*

## **Agradecimientos**

Agradezco de todo corazón a mi familia por brindarme su apoyo en todo momento. Somos una familia numerosa y hemos atravesado muchas dificultades, pero con la ayuda de Jehová siempre hemos salido adelante. A mis padres, mis queridos y lindos hermanos (Katy, Pame, Cami, Diego y Vale), mi cuñado (Aldito) y mi abuelita, ustedes son los seres que más amo en este mundo, en los que he confiado siempre y sobretodo este año en el que más los he necesitado.

Agradezco a todos aquellos amigos que han estado conmigo en todo momento a lo largo de la carrera. A los amigos de la vida; Ximena y Priscilla que me han acompañado sobretodo en mis peores momentos. A mis tíos Jorge y Mireya Cartagena por siempre darme ánimos y a los chicos de la geopequera: Pancha, Toño, Manu, Seba y Nachito que me hicieron reír, bailar y rabiarse todo el semestre. Nunca olvidaré las salidas en bici, los habibis y Machu Pichu.

Agradezco a mi profesor guía, Roberto Gesche, por apoyarme desde el comienzo. A pesar de todo, siempre tuvo un buen consejo y una sonrisa para mí. Realmente fue un agrado trabajar con ud. Agradezco también a los demás profesores de mi comisión, Edgardo y César, por su ayuda, comentarios y observaciones.

Agradezco a la Universidad de Chile por toda la ayuda económica que me brindó durante estos seis años para estudiar, además de formarme como profesional y otorgarme todas las herramientas necesarias para dar un mejor pasar a mis padres.

Agradezco la colaboración de Metro de Santiago, Geodata y Arcadis por brindar toda la información necesaria para la realización de este trabajo.

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	3
2	Antecedentes generales de la construcción de la Línea 3 del Metro.....	4
2.1	Línea 3 del Metro de Santiago.....	4
2.2	Identificación de los piques estudiados.....	6
2.2.1	Pique El Cortijo.....	6
2.2.2	Pique Plaza Chacabuco.....	7
2.3	Método constructivo utilizado en los piques.....	7
2.4	Hitos constructivos durante la construcción de los piques.....	10
2.5	Características geológicas - geotécnicas de la Línea 3 del Metro de Santiago.....	14
2.5.1	Estratigrafía zona de emplazamiento Línea 3.....	14
2.5.2	Parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento de piques.....	18
3	Teorías consideradas en el modelamiento de piques.....	20
3.1	Empuje del suelo en excavaciones verticales.....	20
3.1.1	Empuje de suelo propuesto por AWPA.....	24
3.1.2	Empuje de suelo propuesto por PETRUS.....	27
3.2	Deformaciones estimadas en el sostenimiento del pique.....	29

3.3	Tensiones estimadas en los elementos estructurales del pique. ....	31
4	Instrumentación y monitoreo geotécnico – estructural.....	35
4.1	Dispositivos de monitoreo geotécnico – estructural. ....	35
4.1.1	Celdas de presión.....	35
4.1.2	Strain Meters. ....	38
4.1.3	Monitoreo óptico topográfico de convergencia. ....	41
4.2	Plan de Monitoreo utilizado por Metro de Santiago.....	42
5	Resultados obtenidos. ....	50
5.1	Resultados de datos medidos por celdas de presión.....	50
5.1.1	Pique El Cortijo.....	51
5.1.2	Pique Plaza Chacabuco .....	56
5.2	Resultados de datos medidos por strain meters. ....	62
5.2.1	Pique El Cortijo.....	63
5.2.2	Pique Plaza Chacabuco .....	67
5.3	Resultados de datos medidos por el monitoreo topográfico de convergencia. .	70
5.3.1	Pique El Cortijo.....	70
5.3.2	Pique Plaza Chacabuco. ....	74
6	Discusión y análisis de resultados.....	77

6.1	Diferencias de presiones del suelo sobre el sostenimiento.....	77
6.2	Tensiones en los elementos estructurales del pique.....	84
6.3	Deformaciones del sostenimiento. ....	87
7	Propuestas y recomendaciones.....	88
7.1	Instrumentación instalada. ....	88
7.2	Recomendaciones generales.....	92
8	Conclusiones. ....	96
9	Bibliografía.....	98
	Anexos .....	103
	Anexo A: Planos de construcción. ....	103
	Anexo B: Sistema de Monitoreo.....	104
	Anexo C: Lecturas obtenidas por las celdas de presión. ....	105
	C1. Pique El Cortijo.....	105
	D2. Pique Plaza Chacabuco. ....	108

## Índice de tablas

Tabla 1: Hitos constructivos en Pique El Cortijo.....	12
Tabla 2: Hitos constructivos en Pique Plaza Chacabuco. ....	13
Tabla 3: Propiedades geotécnicas básicas de las unidades geológicas. ....	18
Tabla 4: Coeficientes de empujes en reposo $K_0$ en las unidades geotécnicas.....	19
Tabla 5: Coeficientes de empuje lateral activo $K_a$ en las unidades geotécnicas. ....	19
Tabla 6: Umbrales de presiones en Pique El Cortijo, a profundidades específicas definidos por AWPA (Metro, 2013. P). ....	26
Tabla 7: Umbrales de presiones en Pique Plaza Chacabuco, a profundidades específicas definidos por AWPA (Metro, 2013. Q). ....	26
Tabla 8: Comparación de estimaciones de tensiones horizontales del suelo. ....	29
Tabla 9: Umbrales de deformación en Pique El Cortijo (Metro, 2014.G).....	30
Tabla 10: Umbrales de deformación en Pique Plaza Chacabuco (Metro, 2014. H). ....	30
Tabla 11: Propiedades del Anillo de Refuerzo. ....	32
Tabla 12: Propiedades de Refuerzo Vertical.....	32
Tabla 13: Detalle de celdas de presión instaladas en pique El Cortijo. ....	43
Tabla 14: Detalle de celdas de presión instaladas en pique Plaza Chacabuco. ....	44
Tabla 15: Detalle de strain meters instalados en Pique El Cortijo.....	44
Tabla 16: Detalle de strain meters instalados en Pique Plaza Chacabuco. ....	45



## Índice de figuras

Figura 1: Plano de red del Metro de Santiago (Metro, 2012. B). .....	5
Figura 2: Vista aérea de los Piques analizados.....	6
Figura 3: Elementos estructurales del a) Elevación Pique El Cortijo, b) Elevación Pique Plaza Chacabuco. ....	9
Figura 4: Secuencia de excavación del Pique. Vista en planta (Metro, 2012. C). ....	10
Figura 5: Avance de excavación de los piques. ....	11
Figura 6: Perfil estratigráfico Pique El Cortijo (Metro, 2014. G).....	17
Figura 7: Perfil estratigráfico Pique Plaza Chacabuco (Metro, 2014. H). ....	17
Figura 8: Relación entre $K$ ( $\sigma_h/\sigma_v$ ) y la deformación horizontal para alcanzar el estado activo o pasivo (Lambe and Whitman, 2013). ....	21
Figura 9: Apuntalamiento de excavaciones a cielo abierto a) vista en corte, b) vista en planta (Terzaghi et al., 1996).....	22
Figura 10: Envolvente del diagrama de presiones del suelo a) medida y b) sugerida por Terzaghi y Peck (Terzaghi et al., 1996).....	23
Figura 11: Empuje obtenido para gravas para una profundidad $H = 30m$ (Metro, 2013. O).	25
Figura 12: Empuje estático modificado propuesto por AWPA (Metro, 2014. G).....	25
Figura 13: Diagrama de presiones propuesta por AWPA en a) Pique El Cortijo, b) Pique Plaza Chacabuco. ....	27

Figura 14: Curvas empuje estático entregado por PETRUS (Petrus, 2011). .....	28
Figura 15: Diagrama de Interacción en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo – Pique El Cortijo.....	33
Figura 16: Diagrama de Interacción en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo – Pique Plaza Chacabuco. ....	34
Figura 17. Celdas de presión hidráulicas a) Pique Plaza Chacabuco, b) Pique El Cortijo (Gesche, 2013).....	36
Figura 18: Instalación de celda de presión (Gesche, 2013). ....	37
Figura 19: Strain Meter utilizado en proyecto (Gesche, 2013). ....	38
Figura 20: Disposición de strain meter en a) Refuerzo Vertical, b) Anillo de refuerzo....	39
Figura 21: Instalación de strain meter en a) Refuerzo vertical y b) Anillo de refuerzo (Gesche, 2013).....	40
Figura 22: Miras en los puntos de control al interior del pique (Metro, 2012. E).....	41
Figura 23: Estación total Leica TM30 (Geosystems, 2009).....	42
Figura 24: Instrumentos de Monitoreo Pique Plaza Chacabuco- Elevación frontal (Metro, 2014. H).....	46
Figura 25: Instrumentos de Monitoreo Pique Plaza Chacabuco- Elevación lateral (Metro, 2014. H).....	47
Figura 26: Instrumentos de Monitoreo en Pique El Cortijo - Elevación frontal (Metro, 2014. G). ....	48
Figura 27: Instrumentos de Monitoreo en Pique El Cortijo - Elevación lateral (Metro, 2014. G). ....	49
Figura 28: Diferencias de presiones en a) Nivel 1, b) Nivel 2 y c) Nivel 3 - Pique El Cortijo. ....	52

Figura 29: Diferencias de presiones en a) Eje 1 y 2, b) Eje 3 y c) Eje 4 - Pique El Cortijo. .....	55
Figura 30: Diferencias de presiones en a) Nivel 1, b) Nivel 2, c) Nivel 3 y d) Nivel 4 - Pique Plaza Chacabuco. ....	58
Figura 31: Diferencia de presión en Nivel 1, celda CP5 – Pique Plaza Chacabuco. ....	59
Figura 32: Diferencia de presión en Nivel 2, celda CP6 – Pique Plaza Chacabuco. ....	59
Figura 33: Diferencias de presiones en a) Eje 1, b) Eje 2 y c) Eje 3 - Pique Plaza Chacabuco. ....	61
Figura 34: Deformación unitaria en viga sobre eje de galería – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión). ....	63
Figura 35: Deformación unitaria en columna izquierda (costado Norte) – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión). ....	64
Figura 36: Deformación unitaria en columna a) izquierda (costado Norte) y b) derecha (costado Sur) – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión). ....	66
Figura 37: Deformación unitaria en viga sobre eje de galería – Pique Plaza Chacabuco (valores positivos corresponden a extensión). ....	67
Figura 38: Deformación unitaria en columnas – Pique Plaza Chacabuco (valores positivos corresponden a extensión). ....	69
Figura 39: Desplazamientos radiales medidos en Pique El Cortijo- Periodo A. ....	72
Figura 40: Desplazamientos radiales medidos en Pique El Cortijo- Periodo B. ....	73
Figura 41: Desplazamientos radiales medidos en Pique Plaza Chacabuco – Periodo A. .....	75
Figura 42: Desplazamientos radiales medidos en Pique Plaza Chacabuco – Periodo B. .....	76

Figura 43: Diferencias de presiones en función de la profundidad de avance de la excavación en a) Nivel 1 y b) Nivel 2 - Pique El Cortijo.....	82
Figura 44: Diferencias de presiones en función de la profundidad de avance de la excavación en a) Nivel 1, b) Nivel 2, c) Nivel 3 y d) Nivel 4- Pique Plaza Chacabuco. ...	83
Figura 45: Solicitaciones medidas en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo - Pique El Cortijo.....	85
Figura 46: Solicitaciones medidas en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo - Pique Plaza Chacabuco. ....	86
Figura 47: a) Tubería para inclinómetro, b) Sonda inclinómetro (Sisgeo, 2005). ....	91
Figura 48: Aspectos mínimos a considerar en un proyecto de instrumentación y monitoreo. ....	95
Figura 49: Presiones en Pique El Cortijo, costado norte. ....	105
Figura 50: Presiones en Pique El Cortijo, costado poniente ....	106
Figura 51: Presiones en Pique El Cortijo, costado sur. ....	107
Figura 52: Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado oriente.....	108
Figura 53: Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado sur.....	109
Figura 54: Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado poniente. ....	110

## 1 Introducción

El crecimiento demográfico y la densificación de las ciudades generan la necesidad de buscar mejoras en el sistema de transporte público. Una de estas es la construcción de nuevas Líneas de Metro, implicando la ejecución de grandes obras subterráneas tales como túneles y piques.

Actualmente se están construyendo las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago (Metro) lo que representa un gran desafío de ingeniería. Se realizan grandes excavaciones en zonas densamente pobladas donde se debe garantizar la seguridad durante la ejecución de las obras y el control de las deformaciones. Esto se logra mediante un programa de instrumentación y monitoreo geotécnico y estructural, que consiste en la observación del comportamiento de algunas variables de diseño durante un tiempo y lugar determinado.

Este trabajo se centra en el estudio del plan de instrumentación y monitoreo geotécnico y estructural implementado en dos piques de sección circular, pertenecientes a la Línea 3 del Metro. Los piques corresponden a excavaciones verticales que cuentan con un revestimiento de hormigón armado y están localizados próximos al trazado del túnel. Desde la base de los piques se realiza una excavación horizontal, llamada galería, que une al pique con el túnel. Desde ahí se generan dos frentes de trabajo simultáneos, en direcciones opuestas, para la excavación del túnel.

Los piques estudiados corresponden al Pique El Cortijo y el Pique Plaza Chacabuco, emplazados en la comuna de Conchalí y la comuna de Independencia, respectivamente. Estos tienen la particularidad de situarse en distintos suelos y poseer distintas dimensiones. De ellos se recogen datos medidos por instrumentos tales como celdas de presión, strain meters, prismas de medición de convergencia y teodolitos ópticos electrónicos de alta precisión, con los que se obtienen mediciones de presiones del suelo sobre el manto del pique, tensiones en el hormigón y deformaciones al interior del pique, respectivamente.

Además de garantizar la seguridad de las excavaciones, el plan de instrumentación y monitoreo utilizado por Metro, busca validar las teorías consideradas en el diseño de los piques, las que estiman el desarrollo de las presiones del suelo en excavaciones de manto curvo. Las teorías consideradas para el diseño de los piques, fueron emitidas por el consorcio ARA Worley Parsons-Arcadis (AWPA) y por PETRUS S.A. (PETRUS)

El conocer las magnitudes reales de las presiones del suelo sobre el sostenimiento, permitiría realizar un diseño más eficiente de este. Sin embargo, con las mediciones obtenidas, se conocerá si es posible realizar una adecuada interpretación de los datos medidos y las lecciones aprendidas de este proyecto de instrumentación y monitoreo.

Este trabajo de título se divide en ocho capítulos. El primero es la introducción presente. En el segundo capítulo de este trabajo, se presentan los antecedentes generales de la construcción de los piques estudiados, exponiendo el método constructivo llevado a cabo, los hitos constructivos durante la excavación y los parámetros geotécnicos utilizados para su modelamiento. El tercer capítulo da cuenta de las teorías utilizadas para representar el desarrollo de presiones del suelo sobre el sostenimiento durante la excavación. Además se exponen los valores estimados de presiones del suelo sobre el sostenimiento, deformaciones y tensiones del revestimiento esperados por el modelamiento tridimensional. El cuarto capítulo aborda el proyecto de instrumentación y monitoreo ejecutado, entregando características generales de los equipos utilizados. El quinto capítulo se enfoca en la auscultación de datos y la calidad de ellos para una correcta interpretación. El sexto capítulo corresponde a la discusión y el análisis de los resultados obtenidos. El séptimo capítulo presenta recomendaciones y la formulación conceptual de un proyecto de instrumentación y monitoreo preferible para este tipo de obras. Finalmente, el último capítulo corresponde a las conclusiones de este trabajo.

## 1.1 Objetivos

El objetivo general del trabajo es la descripción y análisis del plan de instrumentación y monitoreo geotécnico – estructural durante la construcción de los piques circulares El Cortijo y Plaza Chacabuco.

Entre los objetivos específicos, se encuentran:

- Verificar que el proyecto de instrumentación y monitoreo utilizado, cumpla con el propósito para el que fue implementado.
- Verificar que los instrumentos de monitoreo escogidos y su disposición en los piques, fueron adecuados en este proyecto.
- Proponer un sistema de instrumentación y monitoreo ideal para este tipo de obras, basado en la experiencia de instrumentación y monitoreo de estos dos piques.

## **2 Antecedentes generales de la construcción de la Línea 3 del Metro.**

El Metro de Santiago es un medio de transporte público subterráneo que nace debido al crecimiento geográfico y poblacional de la ciudad. Sus orígenes se remontan al año 1968, cuando el Presidente de la República, Eduardo Frei Montalva, firma el decreto que marcaría el inicio de este proyecto, comenzando su construcción el 29 de Mayo de 1969 con las obras de la Línea 1 (Metro, 2014).

Las primeras Líneas de Metro construidas fueron las Líneas 1 y 2, realizadas mediante excavaciones a tajo abierto y paredes entibadas con puntales. Con posterioridad se sumaron las Líneas 5 y 4, esta última construida utilizando la técnica del New Austrian Tunnelling Method (NATM) – Nuevo Método Austríaco de Túneles, método en el cual el monitoreo de deformaciones inducidas por las excavaciones es fundamental.

Actualmente se está llevando a cabo la construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro, otorgando una longitud total a la red de Metro de 140 kilómetros que une a 26 comunas de Santiago. A continuación se entregan los aspectos generales y antecedentes de la construcción y diseño de la Línea 3.

### **2.1 Línea 3 del Metro de Santiago.**

La Línea 3 del Metro abarcará una longitud aproximada de 22,1 km., que considera la construcción de 18 estaciones y 20 piques. El trazado completo se proyecta como un túnel subterráneo, el cual se inicia en la comuna de Quilicura en la Caletera de Avda. Américo Vespucio Norte a 250 m al Oriente del nudo de Avda. Américo Vespucio con Autopista Central. Recorre las comunas de Quilicura, Huechuraba, Conchalí, Independencia, Santiago, Ñuñoa y La Reina, terminando en Avda. Larraín 65 m al Poniente de calle Los Litres, de esta última comuna (Metro, 2012. A).

La Figura 1 muestra un plano general de la red del Metro de Santiago, en que la Línea 3 se visualiza con un trazado de color rojo.





**Figura 1:** Plano de red del Metro de Santiago (Metro, 2012. B).

La ingeniería de detalles de piques y galerías para la Línea 3 ha sido desarrollada por el consorcio ARA Worley Parsons-Arcadis (AWPA), mientras que PETRUS S.A. (PETRUS) ha realizado el informe de mecánica de suelos basado en exploraciones geotécnicas con calicatas, ensayos en terreno y de laboratorio, además de la experiencia de proyectos realizados anteriormente para Metro.

El monitoreo geotécnico y estructural estuvo desde un comienzo a cargo de AMEC S.A. (AMEC), sin embargo a partir del 1 de octubre de 2013 la responsabilidad fue asumida por la empresa GEODATA ANDINA S.A. (GEODATA). Los criterios de diseño y las

referencias utilizadas en este trabajo son, en gran parte, informes emitidos por las empresas antes mencionadas.

## 2.2 Identificación de los piques estudiados.

Los piques que han sido instrumentados y serán analizados en este trabajo, corresponden al Pique El Cortijo y el Pique Plaza Chacabuco. En la Figura 2 se visualiza la ubicación de ambos en la Región Metropolitana.

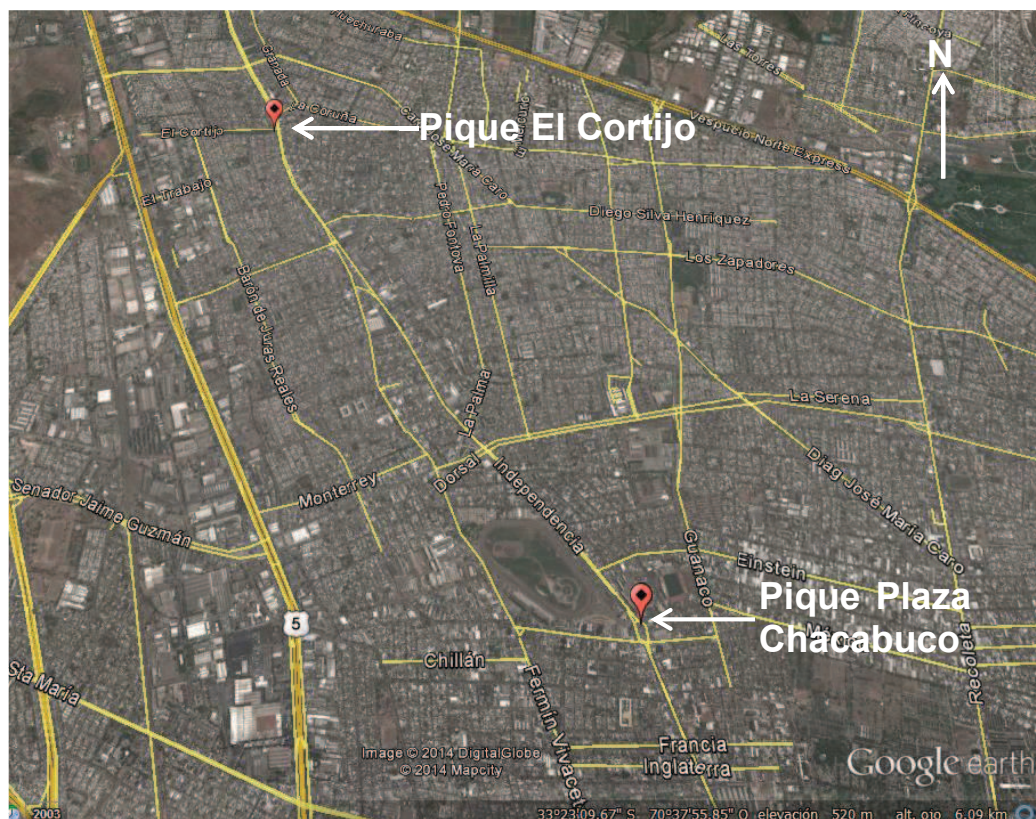


Figura 2: Vista aérea de los Piques analizados.

### 2.2.1 Pique El Cortijo.

El pique de construcción El Cortijo está emplazado en la intersección de Avenida Independencia y la calle El Cortijo en la comuna de Conchalí. Éste corresponde a un pique de construcción del túnel entre las futuras estaciones Cardenal Caro y Vivaceta.

Posee un diámetro de 15 m y una profundidad total de 33 m aproximadamente. Las faenas de construcción se iniciaron durante la segunda semana de abril del año 2013.

### **2.2.2 Pique Plaza Chacabuco.**

El Pique Plaza Chacabuco se ubica en la intersección de Avenida Independencia y la calle Hipódromo Chile en la comuna de Independencia. Éste corresponde a un pique que albergará a la futura estación de igual nombre y posee un diámetro de 25 m y una profundidad de 28,3 m aproximadamente. El inicio de las faenas de construcción fue en la primera semana de Junio del año 2013.

### **2.3 Método constructivo utilizado en los piques.**

Los principales elementos estructurales de los piques dependen de la profundidad que éstos posean y están constituidos por: brocal, manto, anillos de refuerzo y pilares de refuerzo vertical en torno al lugar donde se abrirá la galería de acceso a los túneles de estación y de interestación. A continuación se describe cada uno de ellos y se representan en la Figura 3.

- Brocal: estructura de refuerzo localizada a nivel de superficie en todo el perímetro del pique. Es un anillo de hormigón armado y tiene una altura de entre 1 y 1,5 m.
- Manto: elemento estructural de forma cilíndrica que rodea al pique en toda su profundidad. Está conformado por dos elementos, el revestimiento primario o “sostenimiento” y el revestimiento secundario o simplemente “revestimiento”. El sostenimiento lo constituye un elemento de hormigón armado de rápida ejecución que se construye durante la excavación del pique. El revestimiento secundario, que también es de hormigón armado, es el elemento adosado al sostenimiento y que trabaja como un cuerpo monolítico junto al sostenimiento (Metro, 2012. C). Este segundo elemento se construye durante la etapa de terminaciones del pique, es decir, cuando ya se ha alcanzado la profundidad total de excavación y se construyen las losas de acceso a las Estaciones.

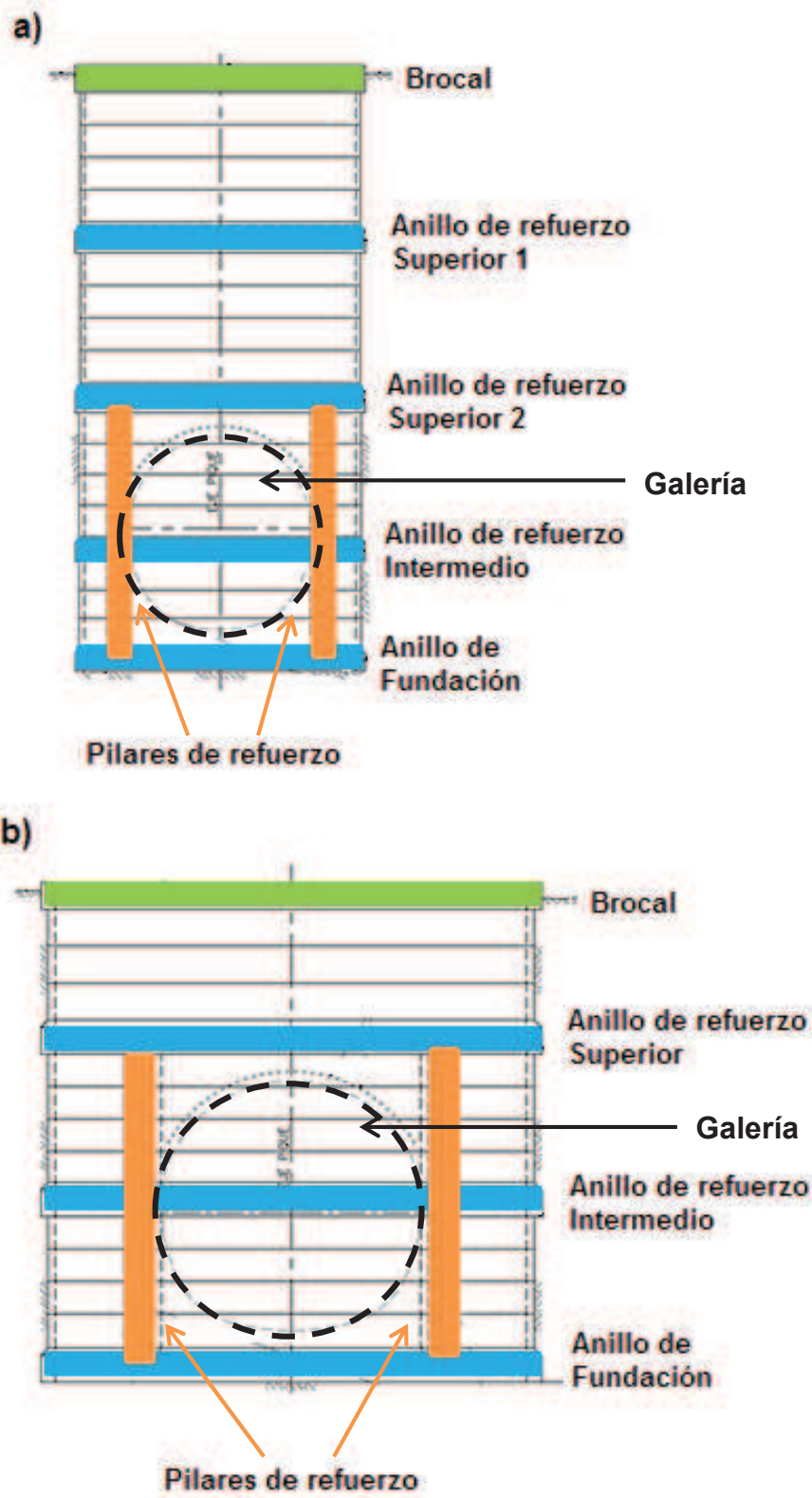
El espesor del sostenimiento dependerá de la ubicación del pique. Si está en suelo fino el manto alcanzará un espesor de 25 cm, mientras que si está en suelo grueso, el espesor será de 40 cm.

- Anillos de refuerzo: estructuras localizadas a ciertas profundidades del pique que le otorgan mayor rigidez. Estos aumentan el roce con el terreno y entrega mayor estabilidad al manto.

El espesor total dependerá de la ubicación del pique. Si está en suelo fino, el anillo de refuerzo alcanzará un espesor de 50 cm, mientras que si está en suelo grueso, el espesor será de 70 cm.

- Pilares de refuerzo: elemento vertical de hormigón armado que refuerza el sostenimiento en el contorno del portal de la galería, extendiéndose hasta el sello de fundación del pique.

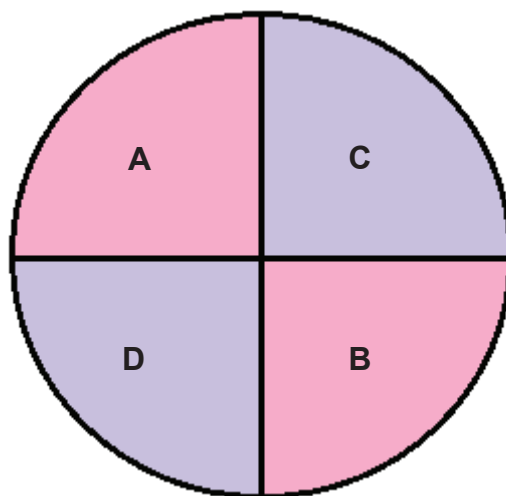
El Pique El Cortijo y el Pique Plaza Chacabuco presentan diferentes profundidades y diámetros. Además, están emplazados en distintos tipos de suelo, por lo que sus elementos estructurales difieren. Lo anterior se observa en la Figura 3, en que el Pique El Cortijo presenta un anillo de refuerzo adicional.



**Figura 3:** Elementos estructurales del a) Elevación Pique El Cortijo, b) Elevación Pique Plaza Chacabuco.

El procedimiento constructivo general de los piques diseñados, consiste en la excavación de bancos o escalones de 2 m de profundidad aproximadamente a partir del brocal. La excavación se ejecuta en cuartos, es decir, la planta del pique se divide en 4 zonas y se va excavando de forma alternada (siguiendo la secuencia A – B – C – D) como se muestra en la Figura 4 (Metro, 2012. B).

A medida que se alcanza las profundidades definidas en los planos de secuencia constructiva, se van ejecutando los distintos elementos estructurales antes definidos. En el Anexo A se presentan los planos que indican la secuencia constructiva detallada para ambos piques.

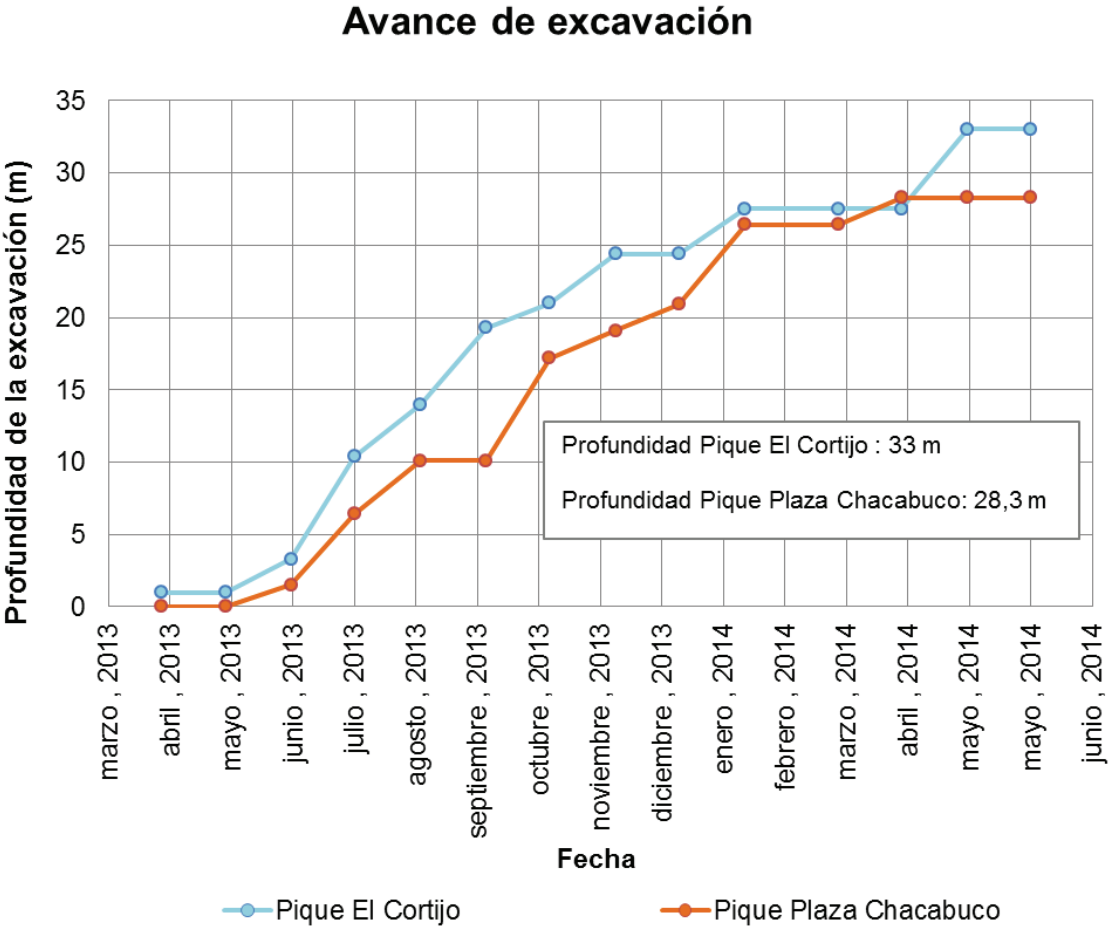


**Figura 4:** Secuencia de excavación del Pique. Vista en planta (Metro, 2012. C).

#### **2.4 Hitos constructivos durante la construcción de los piques.**

Los hitos constructivos durante la construcción de los piques permiten conocer los avances de la excavación y eventos relevantes, que pueden verse reflejados en las lecturas medidas por los instrumentos. La información presentada a continuación, se ha obtenido de los informes de supervisión de obras de Metro entre abril de 2013 y mayo de 2014 (Metro, 2013. A - L; Metro, 2014. A - E).

Las actividades realizadas durante la construcción de los piques, es informada por la Supervisión de Obras perteneciente a AWWA. El avance de las excavaciones es entregado cada mes y se muestra en la Figura 5. Este avance es deducido a partir de la etapa constructiva en que se encuentre el pique, en que cada etapa está indicada en el Anexo A, en los planos constructivos de los piques.



**Figura 5:** Avance de excavación de los piques.

La galería corresponde a un túnel que conecta la base del pique con el trazado del túnel principal. La apertura de la galería, corresponde a uno de los eventos más relevantes durante la obra constructiva, pues se realiza una excavación perpendicular al eje central del pique lo que ocasiona cambios tensionales en el suelo. Para el Pique El Cortijo, esto tuvo lugar el 17 de febrero de 2014, y en el Pique Plaza Chacabuco, el 4 de marzo de

2014. En la Tabla 1 y Tabla 2 se presentan en mayor detalle diversos hitos constructivos de cada pique.

**Tabla 1:** Hitos constructivos en Pique El Cortijo.

<b>Fecha</b>	<b>Hito constructivo</b>	<b>Profundidad de la excavación (m)</b>
<b>Abril 2013</b>	El brocal se encuentra en etapa de hormigonado.	1,0
<b>Mayo 2013</b>	Brocal terminado.	1,0
<b>Junio 2013</b>	Etapa 2 (excavación y ejecución del sostenimientos bajo el brocal) en desarrollo.	3,3
<b>Julio 2013</b>	Etapa 6 (ejecución del sostenimiento del anillo superior 1) en desarrollo, en el segundo cuarto del pique.	10,4
<b>Agosto 2013</b>	Etapa 8 (excavación y ejecución del sostenimiento del manto bajo anillo superior 1) en desarrollo, en el segundo cuarto del pique.	14,0
<b>Septiembre 2013</b>	Etapa 11 (ejecución del anillo superior 2) en desarrollo, en el primer cuarto del pique.	19,3
<b>Octubre 2013</b>	Etapa 12 (excavación y ejecución del sostenimiento del manto bajo anillo superior 2) en desarrollo, en el tercer cuarto del pique.	21,0
<b>Noviembre 2013</b>	Etapa 14 (finalización del manto bajo anillo superior 2) finalizada. Se realizan trabajos previos a la instalación de los tubos paraguas para apertura de galería, en que los tubos paraguas corresponden a un sistema de pre-soporte para el suelo.	24,4
<b>Diciembre 2013</b>	Ejecución de los tubos paraguas.	24,4
<b>Enero 2014</b>	Terminada la instalación de los tubos paraguas. Etapa 16 (ejecución del sostenimiento del anillo de refuerzo intermedio) en desarrollo, en el primer cuarto del pique.	27,5
<b>Febrero 2014</b>	Se comenzó con la excavación y sostenimiento de la galería, alcanzando 8 m de avance en bóveda y 4 m en contrabóveda temporal.	27,5
<b>Marzo 2014</b>	Etapa 16 finalizada. La galería de acceso tiene un avance de 30 m de sostenimiento en bóveda.	27,5
<b>Abril 2014</b>	Se construye el anillo de fundación, en el tercer cuarto del pique.	33,0
<b>Mayo 2014</b>	Se concluye la construcción del anillo de fundación del pique.	33,0



**Tabla 2:** Hitos constructivos en Pique Plaza Chacabuco.

<b>Fecha</b>	<b>Hito constructivo</b>	<b>Profundidad de la excavación (m)</b>
<b>Abril 2013</b>	-	-
<b>Mayo 2013</b>	-	-
<b>Junio 2013</b>	Armado de Brocal.	1,5
<b>Julio 2013</b>	Etapa 4 (excavación y ejecución del sostenimiento bajo el brocal) ya ejecutada.	6,4
<b>Agosto 2013</b>	Etapa 6 (ejecución del anillo de refuerzo) en desarrollo, en el tercer cuarto del pique.	10,1
<b>Septiembre 2013</b>	Etapa 6 finalizada. El hormigonado en el tercer cuarto fue deficiente, pues al endurecerse presentó muchas grietas superficiales, por lo tanto, se demuele 5 cm de espesor hasta la malla interior.	10,1
<b>Octubre 2013</b>	Etapa 10 (ejecución del anillo de refuerzo intermedio) en desarrollo, en el segundo cuarto del pique.	17,2
<b>Noviembre 2013</b>	Etapa 11 (excavación y ejecución del sostenimiento bajo el anillo de refuerzo intermedio) finalizada. Se realizan trabajos previos a la instalación de los tubos paraguas.	19,1
<b>Diciembre 2013</b>	Etapa 12 B (excavación y ejecución del sostenimiento bajo el anillo de refuerzo intermedio) en desarrollo, junto con la instalación de los tubos paraguas.	20,9
<b>Enero 2014</b>	Terminada la instalación de los tubos paraguas. Etapa 15 (ejecución del anillo de fundación) en desarrollo, en el primer cuarto del pique.	26,4
<b>Febrero 2014</b>	Pique en proceso de terminación, alcanzando el último cuarto del anillo de fundación.	26,4
<b>Marzo 2014</b>	Comienza la excavación de la galería de acceso.	28,3
<b>Abril 2014</b>	Trabajos en Galería.	28,3
<b>Mayo 2014</b>	Trabajos en Galería.	28,3

## **2.5 Características geológicas - geotécnicas de la Línea 3 del Metro de Santiago.**

La presente sección entrega una revisión de los antecedentes de la caracterización geológica y geotécnica para la zona donde se emplazará la Línea 3. Esto permite conocer en mayor detalle los parámetros del suelo utilizados en el diseño y modelamiento de los piques. La siguiente información ha sido tomada del el Informe de Revisión de Antecedentes y Validación de Mecánica de Suelos Línea 3 Metro de Santiago, Doc. N°L3-ID-00-INF-000-SU-001 (Metro, 2012. B).

### **2.5.1 Estratigrafía zona de emplazamiento Línea 3.**

A lo largo del trazado de la Línea 3, se identificaron diversas unidades geológicas, en que sus espesores difieren según la zona donde se localicen. Las principales unidades geológicas se presentan a continuación:

- Suelos de cobertura: corresponde a un estrato superficial conformado por materiales como rellenos artificiales, arcillas limosas, limos y gravas, que posee un espesor aproximado de 2 m.
- Gravas del Río Mapocho, “segunda depositación”: compuesto por gravas arenosas con escasa presencia de finos no plásticos. Las partículas son redondeadas con presencia de bolones de 3”. Este estrato alcanza profundidades entre 6 y 9 m. En zonas cercanas a la Estación Plaza Chacabuco, este estrato puede alcanzar una profundidad de 19 m.
- Gravas del Río Mapocho, “primera depositación”: depósito fluvial que a diferencia de la segunda depositación, presenta finos arcillosos de plasticidad media, además de poseer mayor cohesión. Esta sección se localiza por debajo de la “segunda depositación”.
- Finos del Noroeste: está constituido por finos y arcillas, clasificando como CL (arcillas arenosas y arcillas limosas), ML (arenas finas limosas o arcillosas) y CL-ML según el

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS).

- Finos de Conos de Deyección: unidad estratigráfica compuesta por arcillas limosas a limos arcillosos de baja plasticidad, clasificando como CL ML y CL-ML según USCS. Su nombre se debe a que son materiales finos arrastrados por flujos ocasionales y depositados en forma de cono a los pies de quebradas cordilleranas.

De acuerdo a las unidades geológicas mencionadas, se realiza una zonificación de la Línea 3 en cuatro tramos, el Pique El Cortijo se sitúa dentro del tramo L3-A, y el Pique Plaza Chacabuco, entre el tramo L3-B y L3-C. A continuación se describe la estratigrafía característica de cada zonificación indicada.

#### **Tramo L3 – A: Zona de finos del noreste.**

- Ubicación: entre la Cola de Maniobras de la Estación Huechuraba y la Estación Vivaceta.
- Composición: compuesto por Finos del Noreste hasta más de 25 m de profundidad y horizontes de arenas y gravas aislados.
- Nivel freático: de acuerdo a la campaña de exploración, el nivel freático se encontró a los 21 m de profundidad en las vecindades de la estación Huechuraba.

#### **Tramo L3 – B: Zona de transición Finos del Noreste a Gravas del Río Mapocho.**

- Ubicación: entre la Estación Vivaceta y la Estación Plaza Chacabuco.
- Composición: predominio de la “segunda depositación” de Gravas del Río Mapocho, alcanzando profundidades entre 8 m y 19 m. Entre la estación Vivaceta y la Estación Conchalí también existen horizontes erráticos de Finos del Noreste.
- Nivel freático: no se detecta nivel freático.

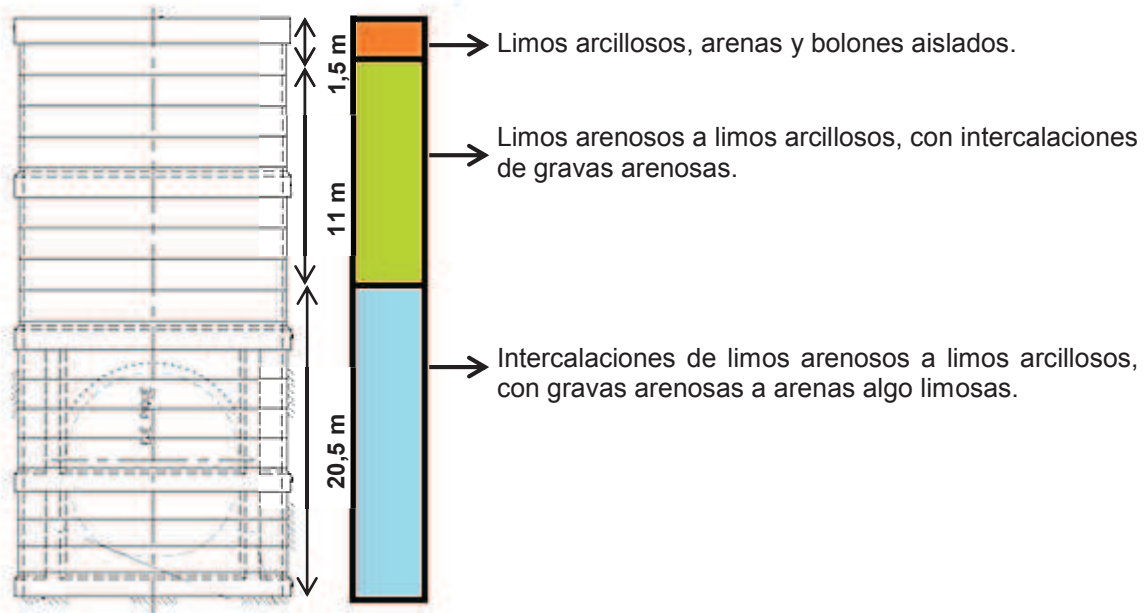
### **Tramo L3 – C: Zona de Gravas del Río Mapocho.**

- Ubicación: entre la Estación Plaza Chacabuco y Estación Diagonal Oriente.
- Composición: existen estratos de la “segunda depositación” de Gravas del Río Mapocho, extendiéndose entre los 2 m y 9 m de profundidad. En sectores cercanos a la Estación Chile – España y la Estación Diagonal Oriente aparece un horizonte de limos y limos arcillosos a una profundidad de entre 16 m y 22 m.
- Nivel freático: no se detecta nivel freático.

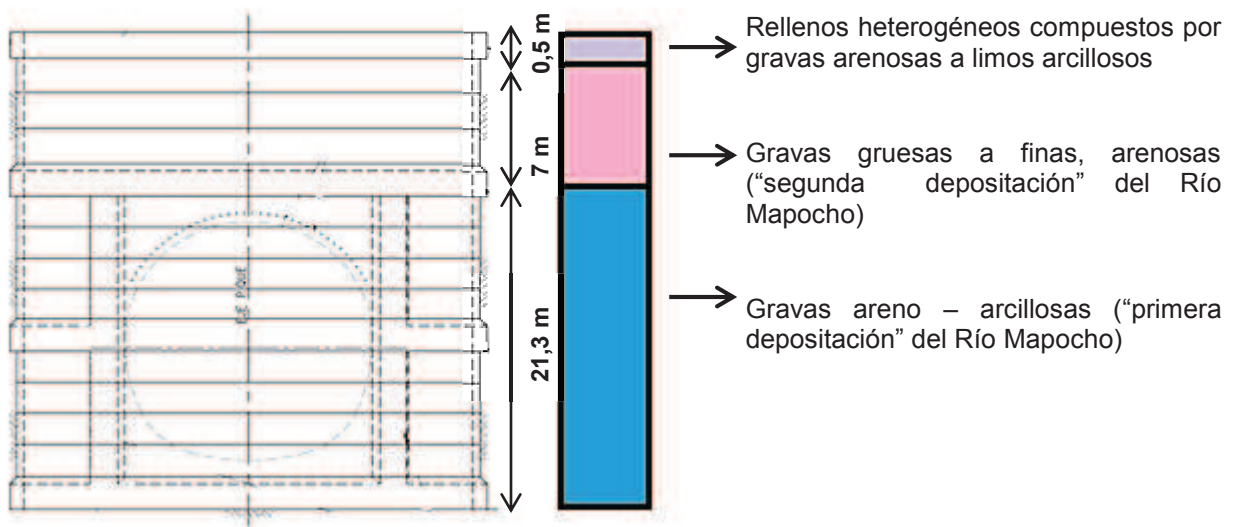
### **Tramo L3 – D: Zona de Gravas del Río Mapocho y Finos de Conos de Deyección.**

- Ubicación: entre la Estación Diagonal Oriente y la Cola de Maniobras de la Estación Larraín.
- Composición: constituidos por Gravas del Río Mapocho y de Finos de Conos de Deyección con espesores entre 5 m y 8m.
- Nivel freático: no se detecta nivel freático.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestran las estratigrafías utilizadas por AWPA en el modelamiento de los Piques El Cortijo y Plaza Chacabuco.



**Figura 6:** Perfil estratigráfico Pique El Cortijo (Metro, 2014. G).



**Figura 7:** Perfil estratigráfico Pique Plaza Chacabuco (Metro, 2014. H).

## 2.5.2 Parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento de piques.

Los parámetros geotécnicos asumidos por AWWA para el modelamiento de piques, se presentan en el Informe de Revisión de Antecedentes y Validación de Mecánica de Suelos Línea 3 Metro de Santiago, Doc. N°L3-ID-00-INF-000-SU-001 (Metro, 2012. B). En esta sección se exponen los parámetros básicos para el diseño de piques y los coeficientes de empujes de acuerdo a los distintos tipos de suelos mencionados en la sección “Estratigrafía zona de emplazamiento Línea 3.

La Tabla 3 resume las propiedades geotécnicas básicas de las unidades geológicas, en que el parámetro Z corresponde la profundidad desde la superficie analizada en metros.

**Tabla 3:** Propiedades geotécnicas básicas de las unidades geológicas.

Unidad Geotécnica	Peso Unitario $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción $\phi$ (°)	Módulo de deformación Es (kPa)	Módulo de Poisson $\nu$
Suelos de Cobertura	18,5	5	30	20000 + 2750*Z	0,30
Finos del Noreste	18,5	Z ≤ 10 m	30	20000 + 2750*Z	0,30
		Z > 10 m	50		
Gravas del Río Mapocho, 2da depositación	22,5	20	45	46000*(Z) <sup>0,5</sup>	0,25
Gravas del Río Mapocho, 1da depositación	22,5	35	45	65000*(Z) <sup>0,5</sup>	0,25
Finos de Conos de Deyección	18,5	Z ≤ 10 m	30	20000 + 2750*Z	0,30
		Z > 10 m	50		

El estado tensional geostático inicial es definido a partir del coeficiente de empuje en reposo  $K_0$ , expuesto en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Coeficientes de empujes en reposo  $K_0$  en las unidades geotécnicas.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b><math>K_0</math></b>	
Gravas del Río Mapocho	0,8	
Finos del Noroeste	$Z \leq 12$ m	0,65
	$Z > 12$ m	0,45
Depósitos de conos de deyección	$Z \leq 12$ m	0,65
	$Z > 12$ m	0,45

Para el análisis de estados tensionales activos, se utilizan los coeficientes de empuje activo expuesto en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Coeficientes de empuje lateral activo  $K_a$  en las unidades geotécnicas.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b><math>K_a</math></b>
Suelos de Cobertura	0,33
Gravas del Río Mapocho	0,17
Finos del Noroeste	0,32
Depósitos de conos de deyección	0,32

### 3 Teorías consideradas en el modelamiento de piques.

La presente sección describe las relaciones que explican el desarrollo de empujes cuando el suelo es excavado y luego sostenido por un elemento de contención (sostenimiento).

Para el diseño de piques circulares, Metro considera el criterio de diseño propuesto por AWWA. Sin embargo, en esta sección también se presenta otro criterio para evaluar las presiones del suelo sobre el sostenimiento propuesto por PETRUS, que invita a la discusión sobre la manera de ver el desarrollo del empuje del suelo sobre el sostenimiento.

Adicionalmente, en esta sección se exponen las deformaciones al interior del pique y las tensiones esperadas en el sostenimiento a partir del diseño utilizado.

#### 3.1 Empuje del suelo en excavaciones verticales.

Los estados tensionales que se desarrollan en un suelo en estado geoestático, están dados por las ecuaciones (3-1) y (3-2), en que éstas aumentan linealmente con la profundidad.

$$\sigma'_v = \gamma \cdot z \quad (3-1)$$

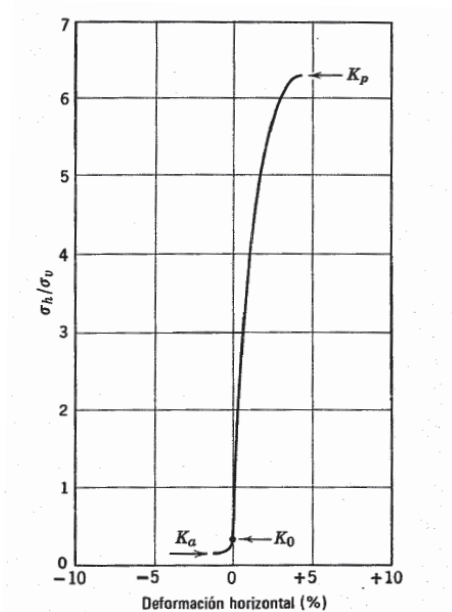
$$\sigma'_h = K_0 \cdot \gamma \cdot z \quad (3-2)$$

Donde:

- $\sigma'_v$ : tensión vertical efectiva (kPa).
- $\sigma'_h$ : tensión horizontal efectiva (kPa).
- $K_0$ : coeficiente de empuje en reposo (adimensional).
- $\gamma$ : peso unitario total del suelo (kN/m<sup>3</sup>).
- $z$ : profundidad del suelo analizada (m).



Cuando se produce un relajamiento o aumento de la tensión horizontal del suelo respecto a la situación de reposo ( $K_0$ ), se tiende a un estado tensional activo o pasivo, respectivamente. El estado tensional activo es de menor magnitud que el estado en reposo, mientras que el estado tensional pasivo es de mayor magnitud. Ambos estados fueron deducidos por Rankine en 1827 (Lambe and Whitman, 2013). Estos estados quedan definidos por los coeficientes de empuje activo  $K_a$  y pasivo  $K_p$  y dependen de las deformaciones que se producen en el suelo. La Figura 8 muestra las deformaciones necesarias para alcanzar los estados activos y pasivos en donde se observa que para alcanzar el estado activo se necesita una pequeña deformación en comparación al caso pasivo. Junto con ello, la relación que se da entre los coeficientes de empuje es  $K_a < K_0 < K_p$ .

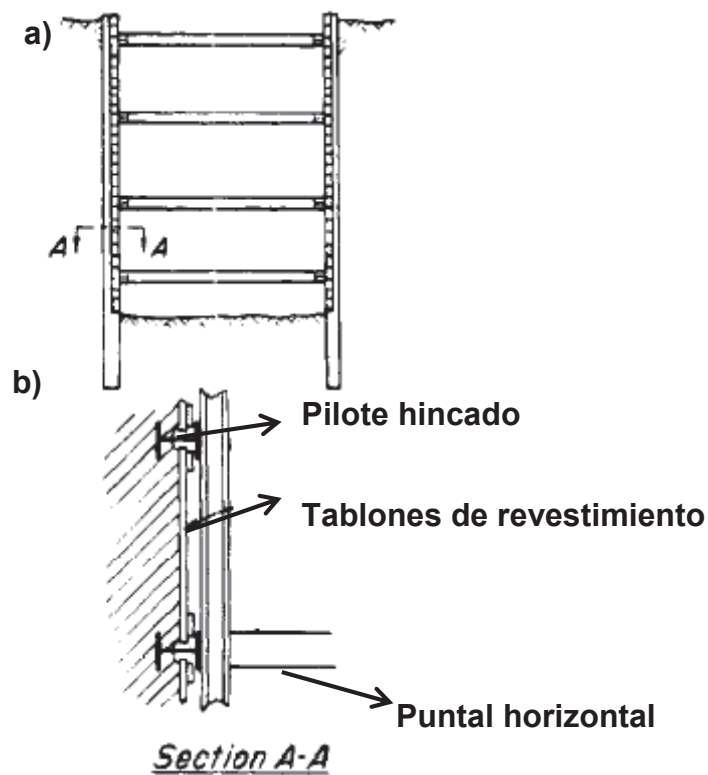


**Figura 8:** Relación entre  $K$  ( $\sigma_h/\sigma_v$ ) y la deformación horizontal para alcanzar el estado activo o pasivo (Lambe and Whitman, 2013).

Una de las teorías más importantes y conocidas para estimar el empuje del suelo al realizarse una excavación, es la que propone Terzaghi y Peck (Terzaghi et al., 1996). Ellos analizan el desarrollo del empuje activo para excavaciones profundas arriostrados

en suelos arenosos, basado en datos empíricos recogidos en los proyectos del metro de Berlín, Munich y Nueva York entre los años 1936-1942.

El método de sostenimiento utilizado durante las excavaciones estudiadas por Terzaghi y Peck (Terzaghi et al., 1996), consiste en el hincado de pilotes junto a tablonces de revestimiento, los que son instalados previo a la excavación como se muestra en la Figura 9. Luego se insertan puntales dispuestos en planos verticales distanciados uniformemente a lo largo de la excavación.



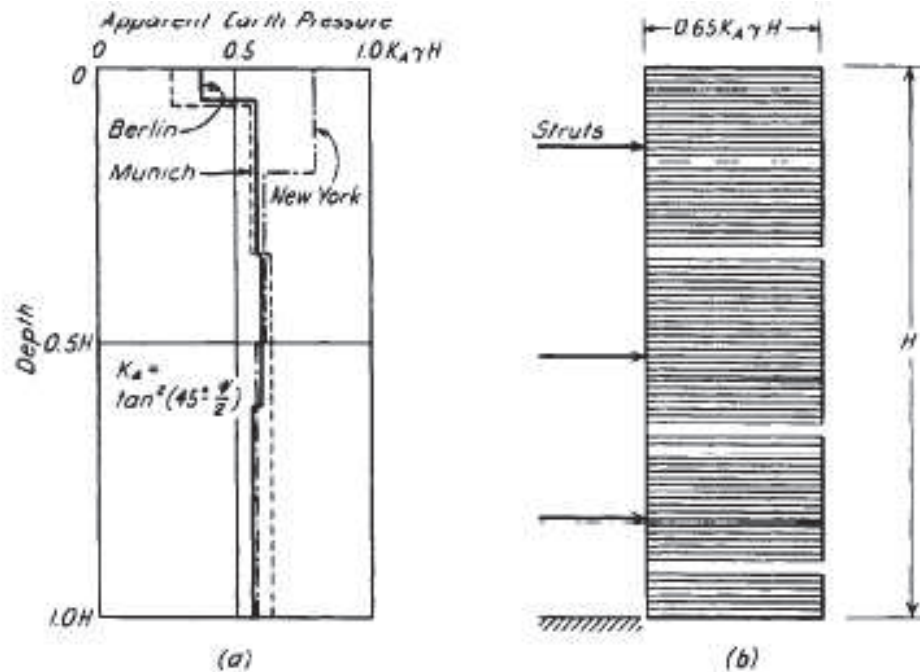
**Figura 9:** Apuntalamiento de excavaciones a cielo abierto a) vista en corte, b) vista en planta (Terzaghi et al., 1996).

Las presiones del suelo obtenidas se estiman a partir de mediciones de las cargas que soportan los puntales en una sección vertical dada. Para ello se supone que la carga en cada puntal es igual al total del empuje que actúa sobre el revestimiento, en un área rectangular colaborante. De esta manera se obtiene un diagrama de presiones aparentes del suelo, presentado en la Figura 10.

Luego, la relación propuesta está dada por la ecuación (3-3) que básicamente aumenta en un 30% el empuje activo de Rankine, debido a que existe restricción de las deformaciones del suelo al considerarse un sistema de apuntalamiento. Junto con ello, proponen una redistribución de las presiones del suelo de una triangular a una rectangular en que H corresponde a la profundidad total de la excavación y  $K_A$  es el coeficiente activo de Rankine dada por la ecuación (3-4) (Terzaghi et al., 1996).

$$\sigma'_h = 1,3 \cdot (0,5 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H) = 0,65 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H \quad (3-3)$$

$$K_A = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (3-4)$$



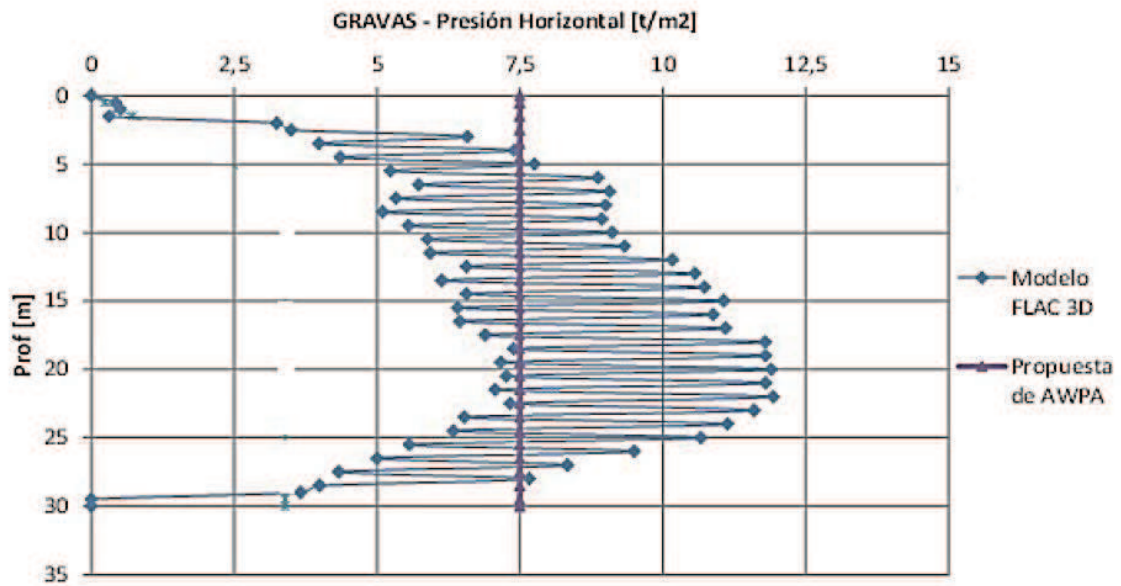
**Figura 10:** Envolvente del diagrama de presiones del suelo a) medida y b) sugerida por Terzaghi y Peck (Terzaghi et al., 1996).

Cabe destacar que el autor menciona que la envolvente del diagrama de presiones del suelo, cubre la máxima carga que puede ocurrir sobre un puntal, siendo el valor más probable de la carga del puntal un 25% inferior que el máximo. Además, para profundidades mayores que 12 m, el diagrama de presiones aparentes del suelo debe usarse con precaución (Terzaghi et al., 1996).

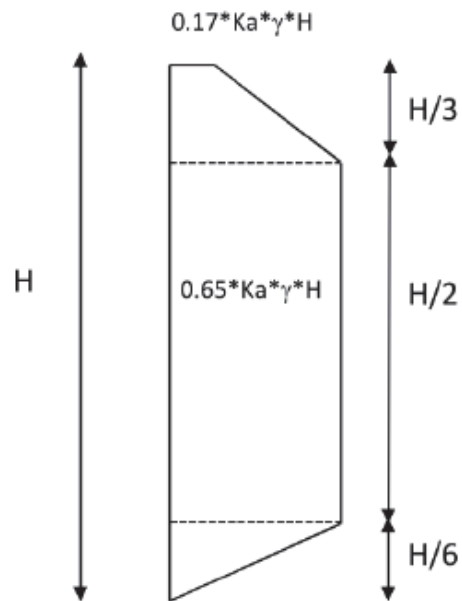
### 3.1.1 Empuje de suelo propuesto por AWPA.

Para determinar el empuje de suelo sobre el sostenimiento en piques circulares, AWPA realiza el diseño de piques a través de una modelación numérica tridimensional con el programa computacional FLAC 3D. Esta modelación permite la simulación de la secuencia constructiva de los piques, donde según ellos, gracias al método constructivo se minimizan las deformaciones del suelo. El resultado obtenido se asemeja a lo propuesto por Terzaghi y Peck, a pesar de que la ecuación (3-3) es formulada para excavaciones planas, AWPA asume que es una aproximación adecuada para el caso de estos piques dado los grandes diámetros.

En la Figura 11 se observa una comparación del empuje de suelo para una profundidad de 30 m utilizando la formulación de Terzaghi y Peck y la calculada mediante el programa FLAC 3D. La forma de la curva "Modelo FLAC 3D", se debe a la secuencia constructiva de relajación y carga generada durante la excavación de los piques y la construcción del manto de hormigón armado (Metro, 2013. M). Mediante la modelación numérica, AWPA decide ajustar el diagrama de empujes propuesto por Terzaghi y Peck, a un diagrama trapezoidal, donde el empuje del suelo disminuye en los extremos superior e inferior, obteniéndose una curva modificada que es la que se observa Figura 12.



**Figura 11:** Empuje obtenido para gravas para una profundidad  $H = 30\text{m}$  (Metro, 2013. O).



**Figura 12:** Empuje estático modificado propuesto por AWPA (Metro, 2014. G).

De la manera antes explicada AWPA obtiene valores esperados del empuje del suelo para distintas profundidades de los piques. Los valores esperados se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7, en que H corresponde la profundidad final del pique analizado y los valores expuestos son:

- Valor esperado: corresponde al valor calculado, correspondiente al empuje estático modificado propuesto por AWPA.
- Umbral de alarma: es el valor del parámetro de control cuando se aleja del valor calculado (aproximadamente del 60% del valor calculado), o cuando se aproxima al colapso de la obra (Metro, 2014. G).

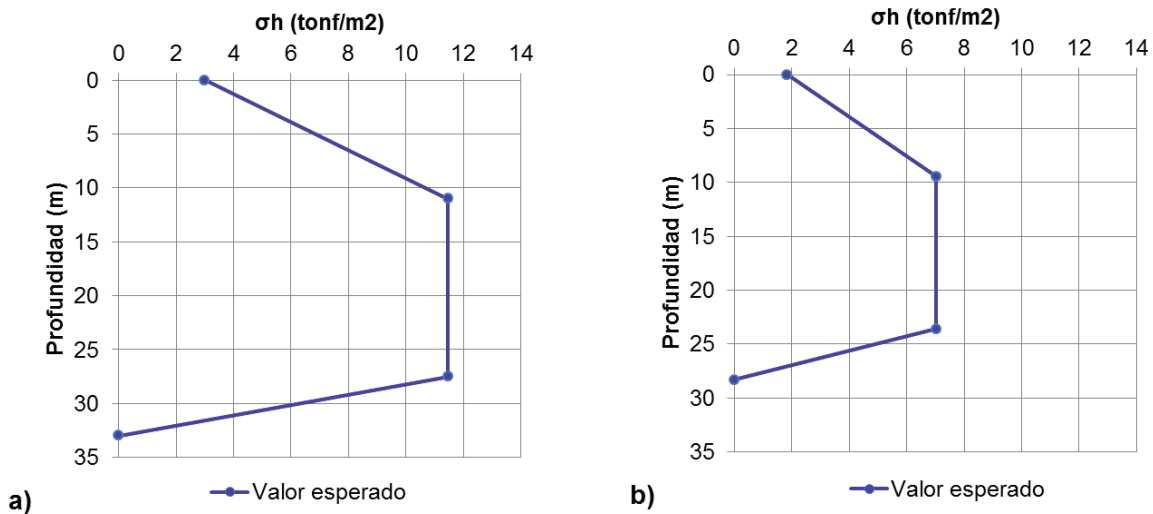
**Tabla 6:** Umbrales de presiones en Pique El Cortijo, a profundidades específicas definidos por AWPA (Metro, 2013. P).

<b>H (m)</b>	<b>Valor esperado (tonf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Umbral de alarma (tonf/m<sup>2</sup>)</b>
9,8	11,1	16,7
18,7	11,5	17,3
27	11,5	17,3

**Tabla 7:** Umbrales de presiones en Pique Plaza Chacabuco, a profundidades específicas definidos por AWPA (Metro, 2013. Q).

<b>H (m)</b>	<b>Valor Esperado (tonf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Umbral de Alarma (tonf/m<sup>2</sup>)</b>
5	4,7	7,1
9	6,9	10,3
14,5	7,0	10,5
20,5	7,0	10,5

En la Figura 13 se observa el diagrama de presiones de suelo esperado sobre el sostenimiento propuesto por AWPA cuando el pique ha alcanzado su profundidad final. Este diagrama de presiones se ha realizado a base del esquema presentado en la Figura 12.

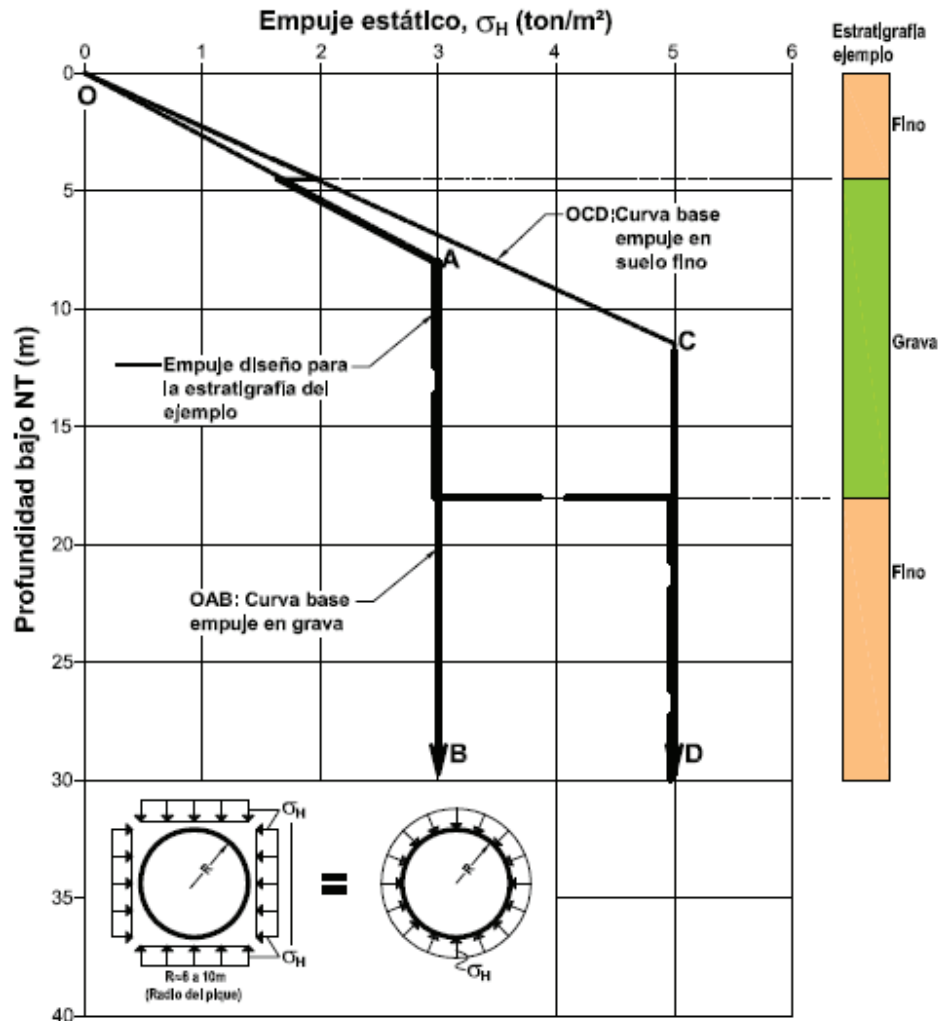


**Figura 13:** Diagrama de presiones propuesta por AWPA en a) Pique El Cortijo, b) Pique Plaza Chacabuco.

### 3.1.2 Empuje de suelo propuesto por PETRUS.

La relación utilizada por PETRUS difiere de las propuestas por AWPA, pues considera el beneficio de la curvatura del frente excavado, lo que provocaría una reducción del empuje del suelo respecto a una situación plana. A diferencia de AWPA, el diagrama empuje propuesto adopta un valor constante a partir de una determinada profundidad del pique.

La Figura 14 presenta el empuje de diseño estático para suelo grueso y suelo fino en piques con diámetros entre 16 m y 20 m. Para piques de 25 m de diámetro, los empujes presentados han de aumentarse en un 30% (Petrus, 2011).



**Figura 14:** Curvas empuje estático entregado por PETRUS (Petrus, 2011).

A partir de la Tabla 6 y Tabla 7 y la Figura 14, se puede comparar los valores de las tensiones horizontales del suelo sobre el sostenimiento obtenidos tanto por AWPA como por PETRUS. Esta comparación se presenta en la Tabla 8, donde se observa que las tensiones propuestas por PETRUS son menores.



**Tabla 8:** Comparación de estimaciones de tensiones horizontales del suelo.

<b>Suelo FINO</b>		
<b>H (m)</b>	<b>AWPA <math>\sigma_H</math> (tonf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>PETRUS <math>\sigma_H</math> (tonf/m<sup>2</sup>)</b>
9,8	11,1	4,2
18,7	11,5	5,0
27	11,5	5,0
<b>Suelo GRUESO</b>		
<b>H (m)</b>	<b>AWPA <math>\sigma_H</math> (tonf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>PETRUS <math>\sigma_H</math> (tonf/m<sup>2</sup>)</b>
5	4,7	2,2
9	6,9	3,9
14,5	7,0	3,9
20,5	7,0	3,9

### **3.2 Deformaciones estimadas en el sostenimiento del pique.**

La deformación del sostenimiento es estimada por AWPA a través de la modelación numérica mediante el software FLAC 3D. Estos valores esperados se muestran para ambos piques en la Tabla 9 y Tabla 10. Los valores expuestos corresponden a deformaciones horizontales admisibles en un sistema de coordenadas radiales, en que los valores positivos indican una deformación hacia el interior del pique.

Los valores indicados como umbral de alerta, corresponden a los valores que indican un aumento importante del valor calculado, cercano a un 50%, del valor esperado. El umbral de alarma corresponde al valor del parámetro de control cuando se aleja del valor calculado, o se aproxima al límite de colapso de la obra, correspondiente al 75% del valor de rotura de la obra (Metro, 2013. R).

**Tabla 9:** Umbrales de deformación en Pique El Cortijo (Metro, 2014.G).

<b>Nivel</b>	<b>Valor esperado (mm)</b>	<b>Umbral de alerta (mm)</b>	<b>Umbral de alarma (mm)</b>
Brocal	1	-	3
Manto superior	3	-	5
Anillo superior	6	9	10
Pilares de refuerzo	7	11	12
Anillo ecuador galería	8	12	14

**Tabla 10:** Umbrales de deformación en Pique Plaza Chacabuco (Metro, 2014. H).

<b>Nivel</b>	<b>Valor esperado (mm)</b>	<b>Umbral de alerta (mm)</b>	<b>Umbral de alarma (mm)</b>
Brocal	3	-	6
Manto superior	4	7	9
Anillo superior	6	9	12
Pilares de refuerzo	7	11	14
Anillo ecuador galería	9	13	18

### 3.3 Tensiones estimadas en los elementos estructurales del pique.

Las tensiones estructurales que se buscan verificar en los elementos estructurales que conforman ambos piques, son las del marco que confina el ojo de la galería. Este está compuesto por un anillo de refuerzo y dos refuerzos verticales o pilares (ver Figura 3). En el Pique El Cortijo y el Pique Plaza Chacabuco, el anillo de refuerzo sobre la galería, está a una profundidad aproximada de 18,7 m y 9 m, respectivamente y los refuerzos verticales se extienden hasta el anillo de fundación.

La Figura 15 y la Figura 16 presentan un diagrama de interacción simplificado que reproduce los diagramas de interacción del anillo de refuerzo y del refuerzo vertical, expuestos en las memorias de cálculo de los piques realizada por AWWA (Metro, 2013. L, M). Este diagrama de interacción simplificado, se obtiene de suponer distintas posiciones del eje neutro en la sección analizada y para cada una de estas, se determina la deformación unitaria asumiendo que el hormigón se encuentra en su deformación última  $\epsilon_u = 0,003$ . Con equilibrio de cargas axiales y momentos se obtiene la tensión del elemento estructural analizado.

La Tabla 11 y la Tabla 12 muestran las propiedades del acero y la sección de hormigón, tanto del anillo de refuerzo como de los refuerzos verticales, utilizados para el desarrollo de los diagramas de interacción. Luego, las solicitaciones a las que se ve sometido el elemento estructural se grafican en el diagrama de interacción. Si dicha solicitación está por debajo de la curva de interacción, la sección diseñada es capaz de resistir las solicitaciones, y por lo tanto cuenta con un adecuado diseño.

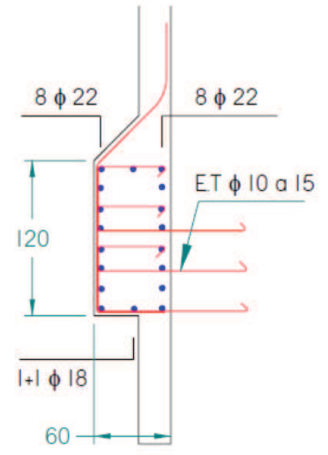
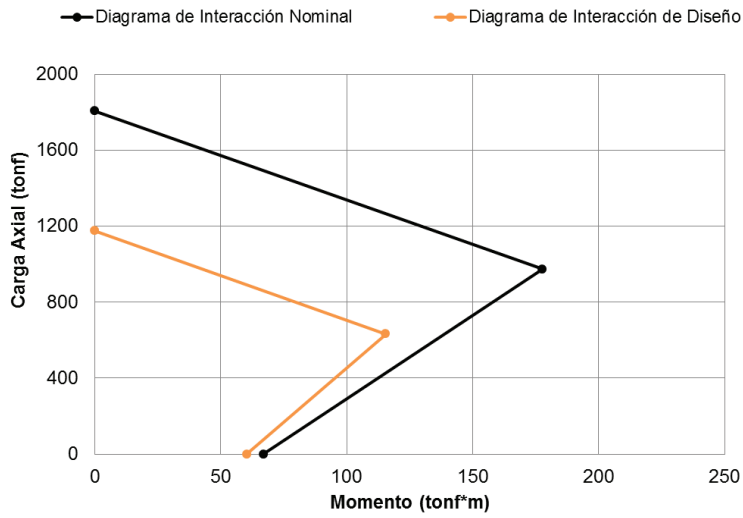
**Tabla 11:** Propiedades del Anillo de Refuerzo.

<b>El Cortijo</b>					
<b>Propiedades Anillo de Refuerzo</b>			<b>Acero</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>d (cm)</b>
Resistencia a compresión hormigón	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	250	8φ22	30,41	5
Parámetro del hormigón	<b>β<sub>1</sub> (-)</b>	0,85	2φ18	5,08	30
Módulo de elasticidad acero	<b>E<sub>s</sub> (MPa)</b>	210000	8φ22	30,41	55
Tensión de fluencia acero	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	420			
Ancho sección	<b>B (cm)</b>	120			
Alto sección	<b>H (cm)</b>	60			
<b>Plaza Chacabuco</b>					
<b>Propiedades Anillo de Refuerzo</b>			<b>Acero</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>d (cm)</b>
Resistencia a compresión hormigón	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	250	10φ22	38,01	5
Parámetro del hormigón	<b>β<sub>1</sub> (-)</b>	0,85	2φ18	5,08	40
Módulo de elasticidad acero	<b>E<sub>s</sub> (MPa)</b>	210000	10φ22	38,01	75
Tensión de fluencia acero	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	420			
Ancho sección	<b>B (cm)</b>	150			
Alto sección	<b>H (cm)</b>	80			

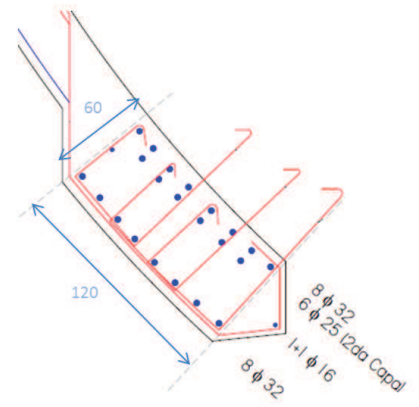
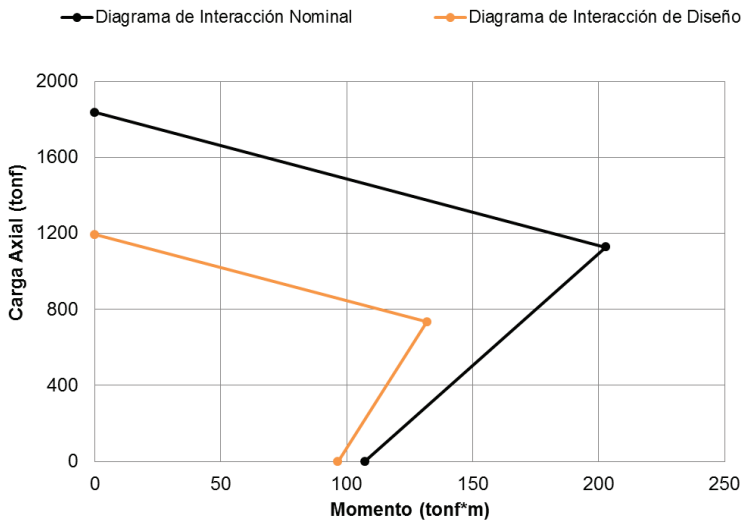
**Tabla 12:** Propiedades de Refuerzo Vertical.

<b>El Cortijo</b>					
<b>Propiedades Refuerzo Vertical</b>			<b>Acero</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>d (cm)</b>
Resistencia a compresión hormigón	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	250	8φ32	64,33	5
Parámetro del hormigón	<b>β<sub>1</sub> (-)</b>	0,85	2φ18	5,08	25
Módulo de elasticidad acero	<b>E<sub>s</sub> (MPa)</b>	210000	6φ25	29,45	40
Tensión de fluencia acero	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	420	8φ32	64,33	45
Ancho sección	<b>B (cm)</b>	120			
Alto sección	<b>H (cm)</b>	50			
<b>Plaza Chacabuco</b>					
<b>Propiedades Refuerzo Vertical</b>			<b>Acero</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>d (cm)</b>
Resistencia a compresión hormigón	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	250	12φ28	73,89	5
Parámetro del hormigón	<b>β<sub>1</sub> (-)</b>	0,85	8φ28	49,26	8
Módulo de elasticidad acero	<b>E<sub>s</sub> (MPa)</b>	210000	8φ32	64,33	72
Tensión de fluencia acero	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	420	12φ32	96,5	75
Ancho sección	<b>B (cm)</b>	200			
Alto sección	<b>H (cm)</b>	80			

**a) Anillo Refuerzo**

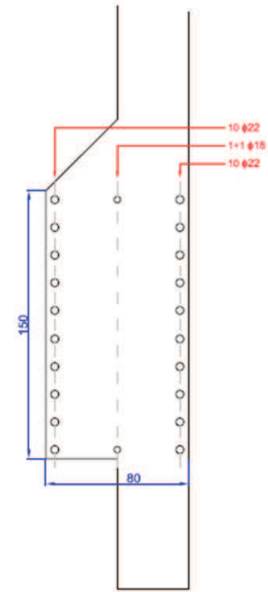
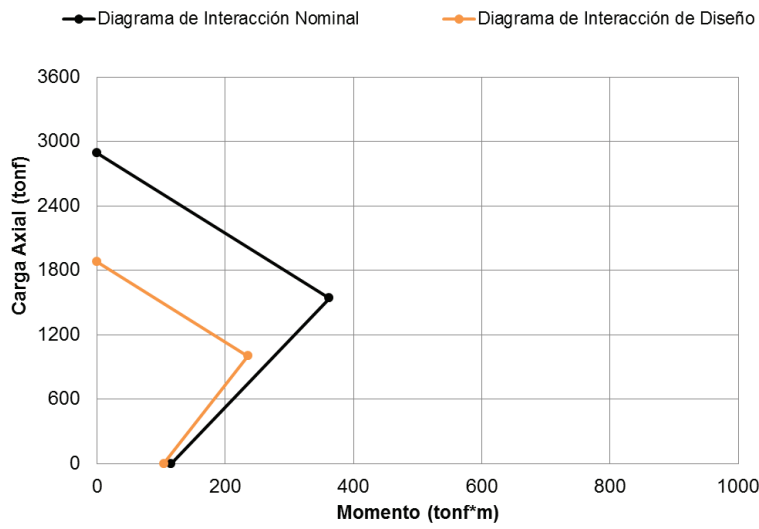


**b) Columna de Refuerzo**

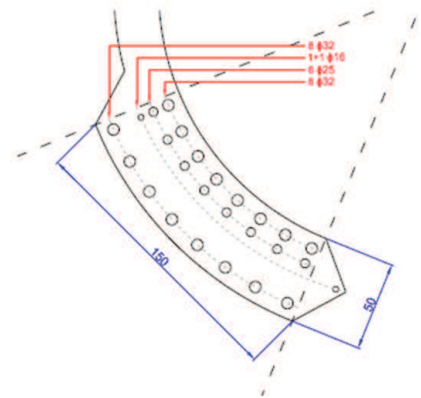
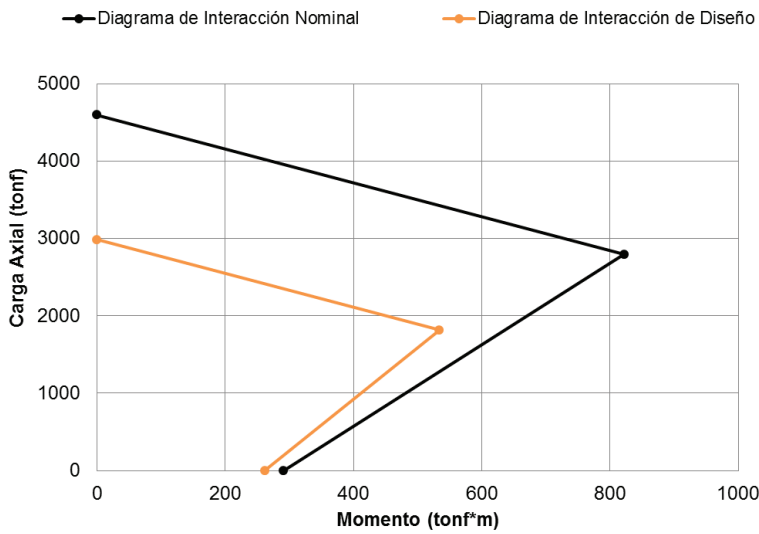


**Figura 15:** Diagrama de Interacción en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo – Pique El Cortijo.

**a) Anillo Refuerzo**



**b) Columna de Refuerzo**



**Figura 16:** Diagrama de Interacción en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo – Pique Plaza Chacabuco.

## **4 Instrumentación y monitoreo geotécnico – estructural.**

### **4.1 Dispositivos de monitoreo geotécnico – estructural.**

Los dispositivos de monitoreo geotécnico y estructural, tienen como fin la medición y control de diversas variables que permita llevar un control de las estructuras durante la construcción y operación, además de validar y mejorar los modelos de cálculo teóricos utilizados.

A continuación se describen los principales dispositivos utilizados durante el monitoreo geotécnico y estructural en las excavaciones de los piques estudiados.

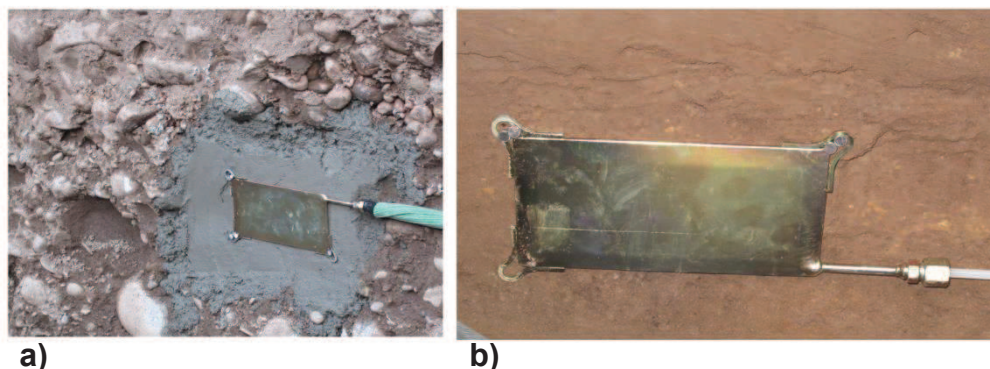
#### **4.1.1 Celdas de presión.**

Las celdas de presión son dispositivos utilizados para medir estados tensionales en bloques de hormigón, roca o en la superficie de contacto entre una estructura y el terreno. En este proyecto, son utilizadas para medir las presiones entre el suelo y el sostenimiento. Un tipo de celdas son las de funcionamiento hidráulico

Estas celdas de presión están formadas por dos placas circulares o rectangulares de acero soldadas entre sí alrededor del perímetro las que se encuentran separadas por una cavidad al vacío que contiene un líquido, comúnmente aceite desaireado. La presión total que actúa desde el exterior sobre la celda, es equilibrada por una presión igual inducida en el líquido interno. Estas son colocadas contra terreno sobre un mortero de nivelación cuando la superficie no es lisa. Las lecturas se obtienen mediante unidades de lectura portátiles o dataloggers colocados en un nivel donde sea posible obtener las lecturas.

Las celdas de presión utilizada por Metro de Santiago, corresponden a “células de presión hidráulicas” de la marca SISGEO del modelo OPK45HE2000 y de origen italiano. Corresponde a una celda rectangular de 100x200 mm, con un espesor de 5 mm (TUE, 2014). Estas tienen un sensor de cuerda vibrante que mide presiones en un rango entre 0 y 2MPa. Además el rango de temperatura en el cual funciona está entre los -20°C y

80°C (Sisgeo, 2005). La Figura 17 muestra la celda de presión instalada en ambos piques.



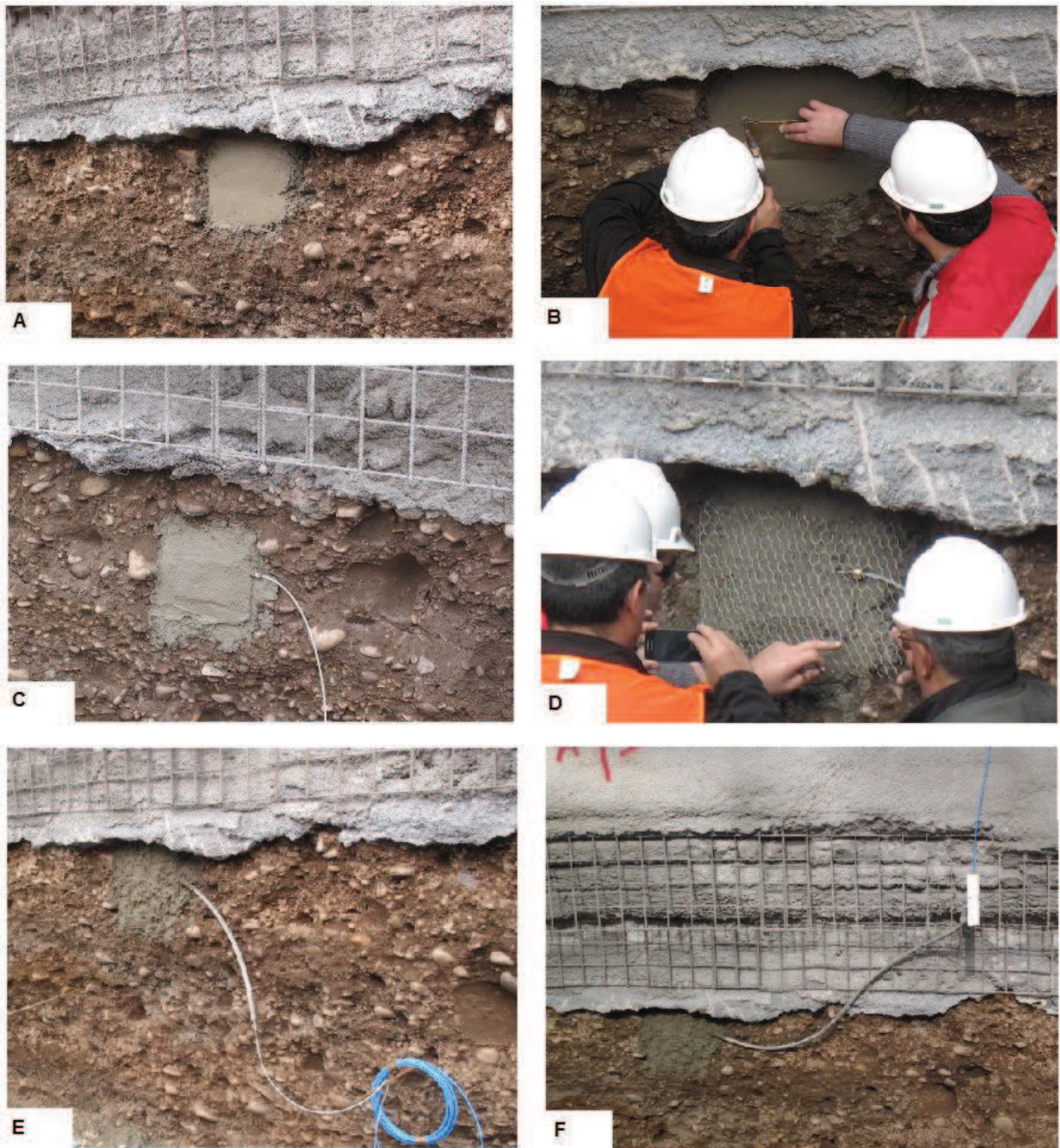
**Figura 17.** Celdas de presión hidráulicas a) Pique Plaza Chacabuco, b) Pique El Cortijo (Gesche, 2013).

Una de las características de estas celdas de presión es la capacidad de re-presurización, que consiste en un ajuste manual de la presión interna de la celda, para expandirla después del fraguado del hormigón. Esta propiedad es de gran utilidad cuando se ha perdido el contacto de la celda con el suelo o el hormigón. También es útil cuando la celda no se encuentra operando dentro del rango definido por el fabricante (TUE, 2014).

El procedimiento para instalar la celda de presión se observa en la Figura 18. La instalación consiste primeramente en limpiar la superficie donde se instalará el instrumento y aplicar un mortero de nivelación de espesor entre 2,5 cm a 10 cm (A) en caso de tener suelos gruesos y dejándolo fraguar por al menos 20 minutos. En caso de suelo fino, la aplicación del mortero de nivelación no es estrictamente necesaria. Luego de ello, la celda puede ser fijada con clavos (B) y se aplica una delgada capa de mortero para protegerla (C) y se cubre con una malla tipo gallinero (D). La malla tipo gallinero también se cubre con una capa delgada de mortero dejándola fraguar idealmente durante al menos 24 horas (E), antes de construir el sostenimiento definitivo mediante la aplicación del hormigón proyectado. La manguera de presurización también es protegida



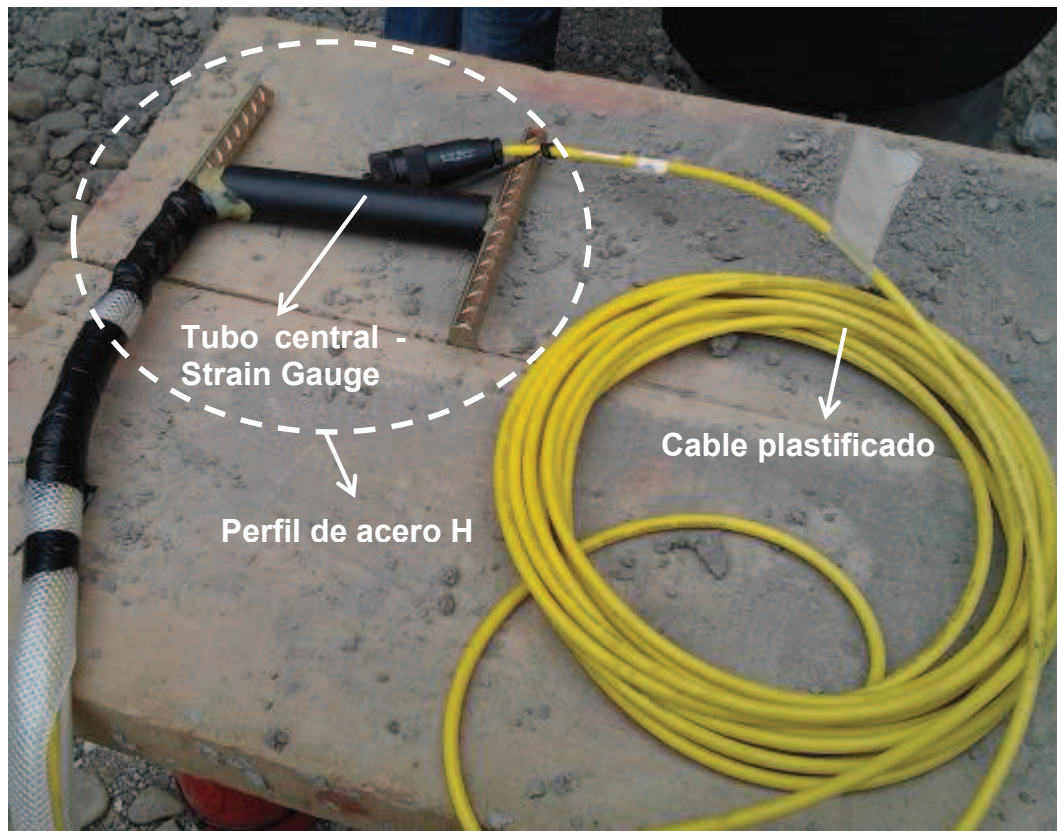
con una planza de diámetro igual a  $\frac{1}{2}$ "", la que se extiende desde la celda hasta la superficie, lugar donde se realizan las lecturas (F). (Geosinergia, 2013).



**Figura 18:** Instalación de celda de presión (Gesche, 2013).

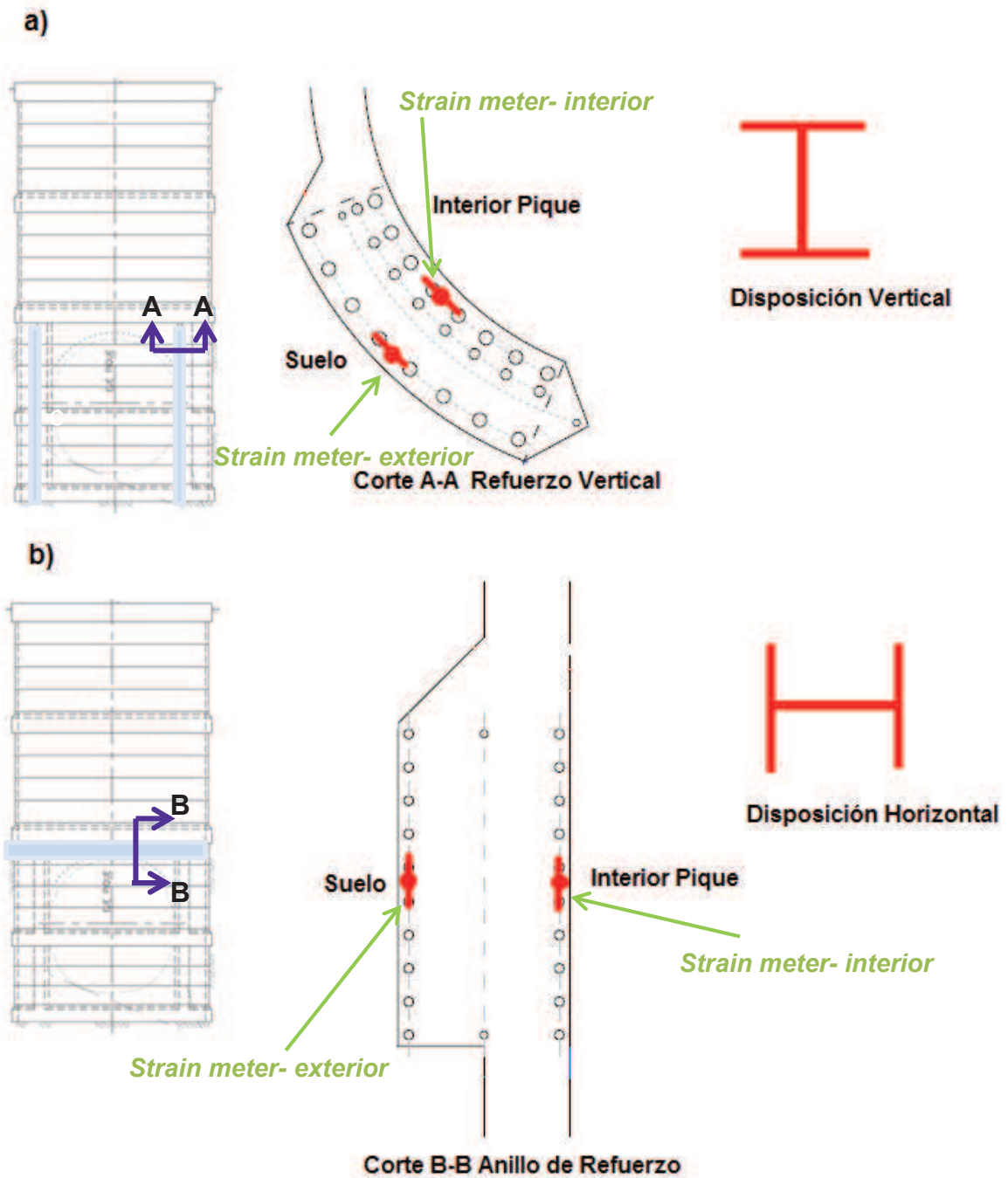
#### 4.1.2 Strain Meters.

Los strain meters corresponden a dispositivos utilizados por instrumentación estructural que permite conocer las tensiones, a través de la medición de deformaciones en sostenimientos. Estos están constituidos por un marco metálico en forma de “H” conteniendo en el alma del perfil un strain gauge. La Figura 19 muestra el tipo de strain meter instalado por Metro, que corresponde a un sensor fabricado por la empresa GEODATA que a través de un cable de 6 conductores, la señal es transmitida desde el strain gauge a una lectora portátil MINOS que mide la deformación unitaria del sensor en unidades de  $\mu\text{m}/\text{m}$  (TUE, 2014).



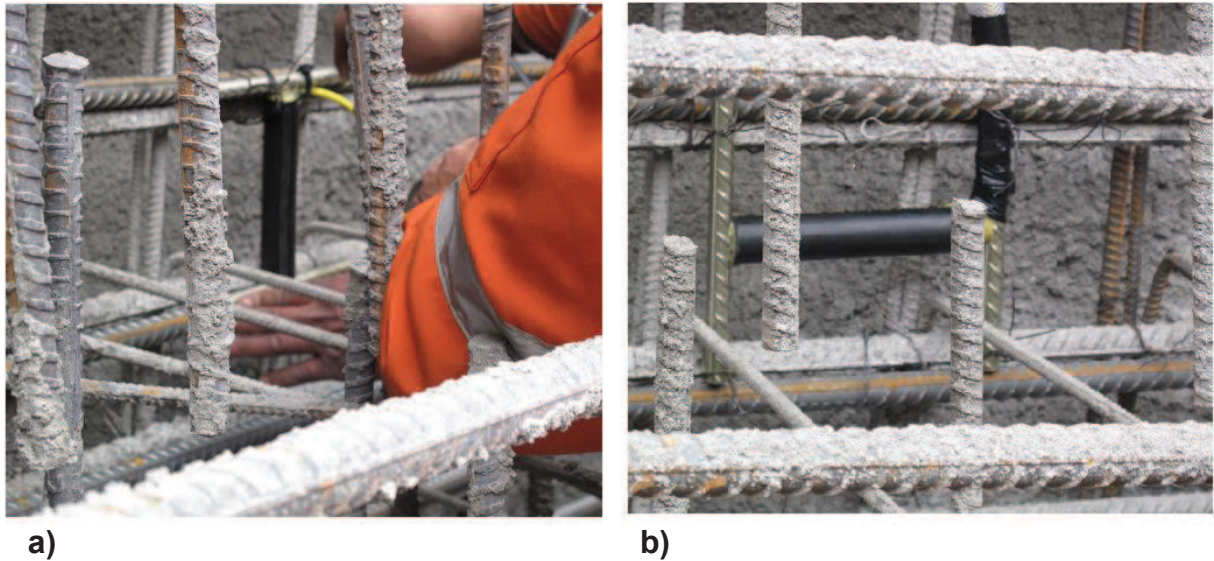
**Figura 19:** Strain Meter utilizado en proyecto (Gesche, 2013).

De acuerdo a la instalación propuesta por el plan de monitoreo, los strain meters son dispuestos, en anillos de refuerzos, en orientación horizontal y en pilares de refuerzo en orientación vertical. Además se colocan de a pares en cada sección, teniendo strain meter interior y exterior, indicados en la Figura 20.



**Figura 20:** Disposición de strain meter en a) Refuerzo Vertical, b) Anillo de refuerzo.

La Figura 21 muestra la instalación del strain meter y la orientación de éste en la armadura tanto del refuerzo vertical como en el anillo de refuerzo del pique.

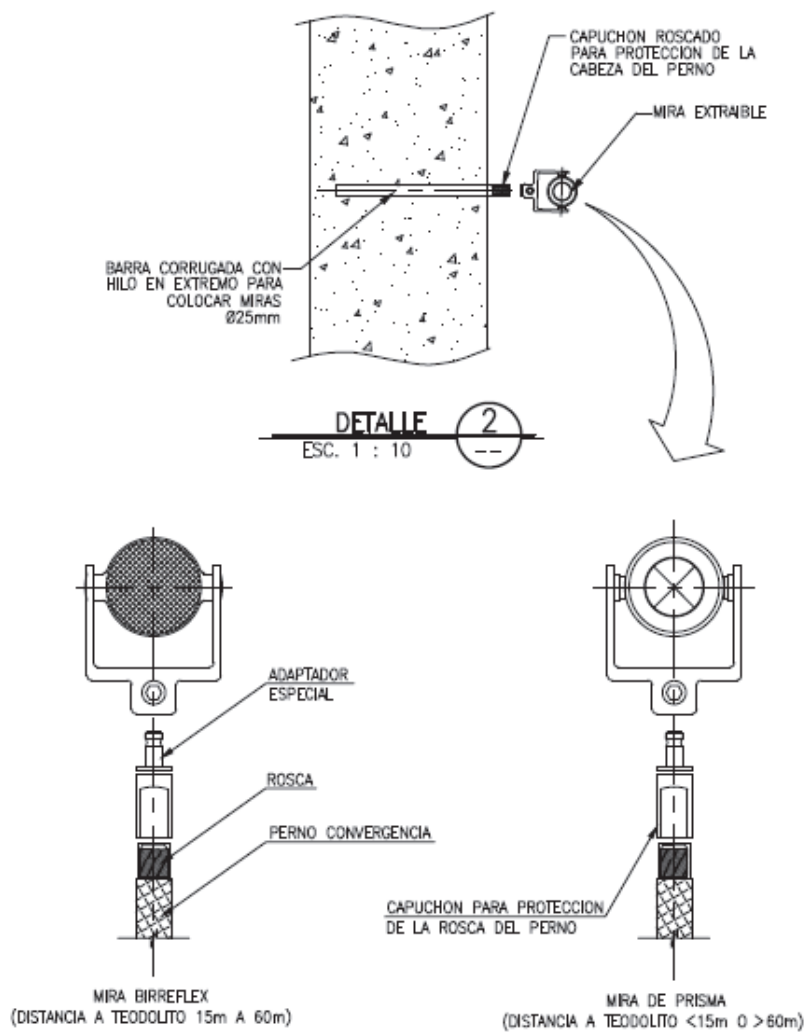


**Figura 21:** Instalación de strain meter en a) Refuerzo vertical y b) Anillo de refuerzo (Gesche, 2013).

El procedimiento para instalar los strain meters consiste en fijar el marco metálico a la armadura del manto del pique mediante alambre, que impida el movimiento del instrumento cuando se aplique el hormigón proyectado sobre él. El cable que lleva la señal, se protege con una cañería de plástico hasta el lugar donde se realizan las lecturas indicando si corresponde al strain gauge interior o exterior del sistema. Tras aplicar el hormigón proyectado que forma el sostenimiento y el cual cubre el strain meter, se realiza la primera medición. La lectura cero queda definida al completar tres lecturas después de aplicar el hormigón proyectado (Metro, 2013. N).

### 4.1.3 Monitoreo óptico topográfico de convergencia.

El monitoreo de convergencia consiste en un monitoreo óptico tridimensional de deformaciones del sostenimiento al interior del pique. Este sistema está constituido por prismas de medición topográfica de tipo OMNI y BIRREFLEX. El uso de uno u otro depende de la distancia de medición. Por ejemplo, si el prisma se ubica entre los 15 m y 60 m de distancia desde el punto de referencia, se ocupa una mira BIRREFLEX. Los del tipo OMNI se utilizan cuando esta distancia es menor a 15 m o mayor que 60 m. Estas se presentan en la Figura 22.



**Figura 22:** Miras en los puntos de control al interior del pique (Metro, 2012. E).

Las mediciones se llevan a cabo por una estación total (teodolito) modelo Leica TM30 que se muestra en la Figura 23. Para mediciones angulares se tiene una precisión de 0,5". En el caso que se utilice como distanciómetro, la precisión del instrumento es de  $1 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ , donde la cifra de 1 mm es una parte fija del error y la cifra 1 ppm indica 1 mm por cada kilómetro de medición.



**Figura 23:** Estación total Leica TM30 (Geosystems, 2009).

La primera lectura de las miras, se realiza después de aplicada la primera capa de hormigón proyectado alrededor del perímetro del pique. Tras la aplicación de la segunda capa, los puntos de control han de ser reemplazados inmediatamente por otro, en el mismo lugar y realizar una medida inicial.

#### **4.2 Plan de Monitoreo utilizado por Metro de Santiago.**

El plan de monitoreo propuesto por Metro para los piques El Cortijo y Plaza Chacabuco consiste en la instalación de celdas de presión, strain meters y prismas de medición para el monitoreo topográfico de convergencia.

Los objetivos principales de Metro para realizar monitoreo e instrumentación geotécnica y estructural durante la construcción y operación de los piques, se presentan a continuación (Metro, 2012. D):

- Controlar el desarrollo de presión del suelo sobre el sostenimiento para verificar el modelo geotécnico utilizado en el diseño. Para ello se proyecta la instalación de celdas de presión entre el contacto suelo – sostenimiento.
- Verificar la estabilidad de la estructura en relación al control de deformaciones. Por lo tanto se instalan prismas topográficos en el sostenimiento para hacer control de las deformaciones mediante monitoreo topográfico de convergencia.
- Controlar el desarrollo de tensiones en el sostenimiento y verificar el diseño de la armadura. Para ello se proyecta la instalación de strain meters en el marco que refuerza la zona donde se ubica la galería.

En el pique El Cortijo se instalaron 8 celdas de presión a distintas profundidades como se indica en la Tabla 13. Las celdas localizadas en orientación oriente, son las que se encuentran sobre el eje de la galería.

**Tabla 13:** Detalle de celdas de presión instaladas en pique El Cortijo.

<b>Celda de Presión</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Orientación</b>	<b>N° de Serie</b>	<b>Fecha de Instalación</b>
CP 01	9,8	Norte	P131441	19-07-2013
CP 04	9,8	Poniente	P131443	19-07-2013
CP 07	9,8	Oriente	P131439	29-07-2013
CP 02	18,7	Norte	P131430	23-09-2013
CP 05	18,7	Poniente	P131434	23-09-2013
CP 08	18,7	Oriente	P131431	30-09-2013
CP 03	27,0	Sur	P131442	31-01-2014
CP 06	27,0	Poniente	P131436	11-02-2014

En el pique Plaza Chacabuco se instalaron 10 celdas de presión a distintas profundidades como se indica en la Tabla 14. Las celdas localizadas en orientación poniente, son las que se encuentran sobre el eje de la galería.

**Tabla 14:** Detalle de celdas de presión instaladas en pique Plaza Chacabuco.

<b>Celda de Presión</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Orientación</b>	<b>N° de Serie</b>	<b>Fecha de Instalación</b>
CP 07	5,00	Sur	P131447	30-07-2013
CP 05	5,00	Poniente	P131433	30-07-2013
CP 01	5,00	Oriente	P131446	05-08-2013
CP 08	8,85	Sur	P131438	14-08-2013
CP 06	8,85	Poniente	P131444	14-08-2013
CP 02	8,85	Oriente	P131445	21-08-2013
CP 03	14,60	Oriente	P131440	25-09-2013
CP 09	14,60	Sur	P131435	25-09-2013
CP 10	20,50	Sur	P131429	21-11-2013
CP 04	20,50	Oriente	P131428	21-11-2013

En ambos piques se instalaron tres pares de strain meters. Un par en el anillo de refuerzo sobre el eje de la galería y los otros dos pares en las columnas ubicadas a cada lado del ojo de la galería.

**Tabla 15:** Detalle de strain meters instalados en Pique El Cortijo.

<b>Strain Meter</b>	<b>N° de Serie</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Ubicación relativa</b>	<b>Elemento estructural</b>
SG1	SSM-1/03 # 34	08-10-2013	exterior	viga
SG2	SSM-1/03 # 38	11-10-2013	interior	viga
SG3	SSM-1/03 # 1387	10-02-2014	interior	pilar izq.
SG4	SSM-1/03 # 1509	10-02-2014	exterior	pilar izq.
SG5	SSM-1/03 # 340	04-02-2014	interior	pilar der.
SG6	SSM-1/03 # 342	05-02-2014	exterior	pilar der.



**Tabla 16:** Detalle de strain meters instalados en Pique Plaza Chacabuco.

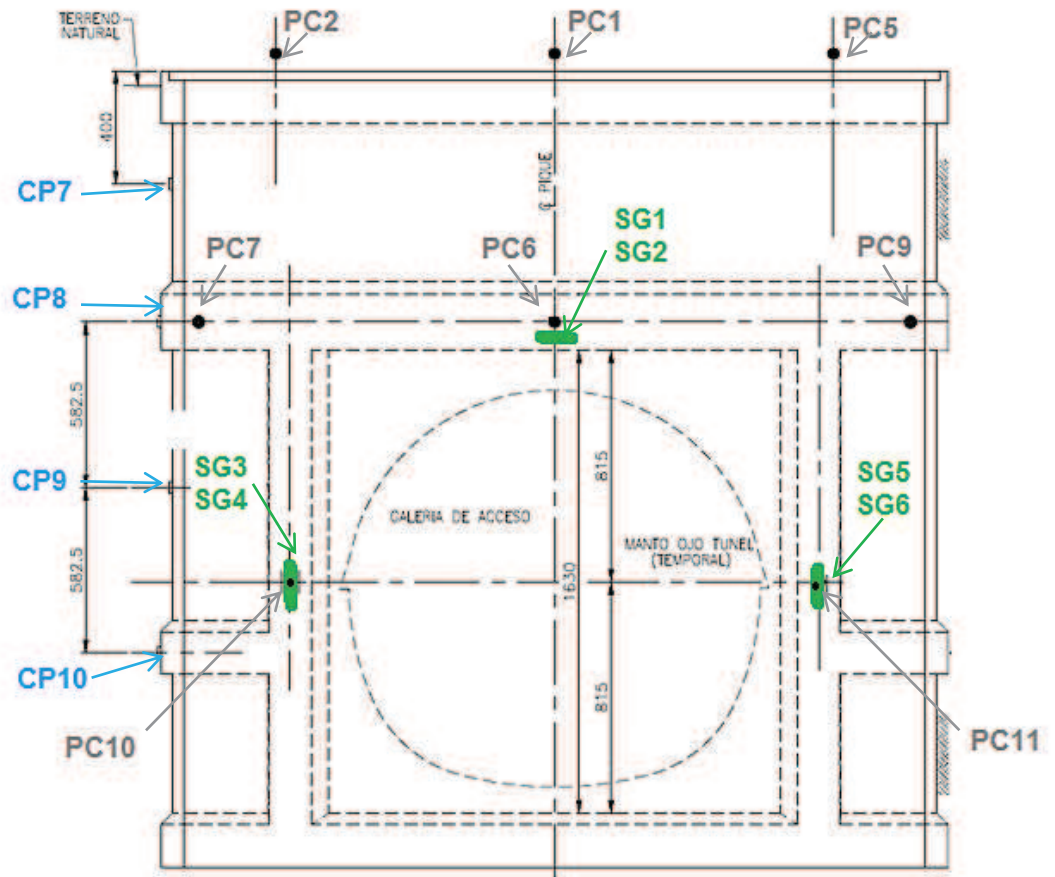
<b>Strain Meter</b>	<b>N° de Serie</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Ubicación relativa</b>	<b>Elemento estructural</b>
SG1	SSM-1/03 # 418	04-09-2014	exterior	viga
SG2	SSM-1/03 # 961	04-09-2014	interior	viga
SG3	SSM-1/03 # 717	15-11-2014	exterior	pilar izq.
SG4	SSM-1/03 # 955	15-11-2014	interior	pilar izq.
SG5	SSM-1/03 # 337	26-11-2014	interior	pilar der.
SG6	SSM-1/03 # 956	26-11-2014	exterior	pilar der.

Para el monitoreo topográfico de convergencia se proyectan siete secciones de monitoreo al interior del Pique El Cortijo y cuatro para el Pique Plaza Chacabuco. Dichas secciones de monitoreo constan de cuatro y cinco prismas localizados al interior del pique, sobre el sostenimiento.

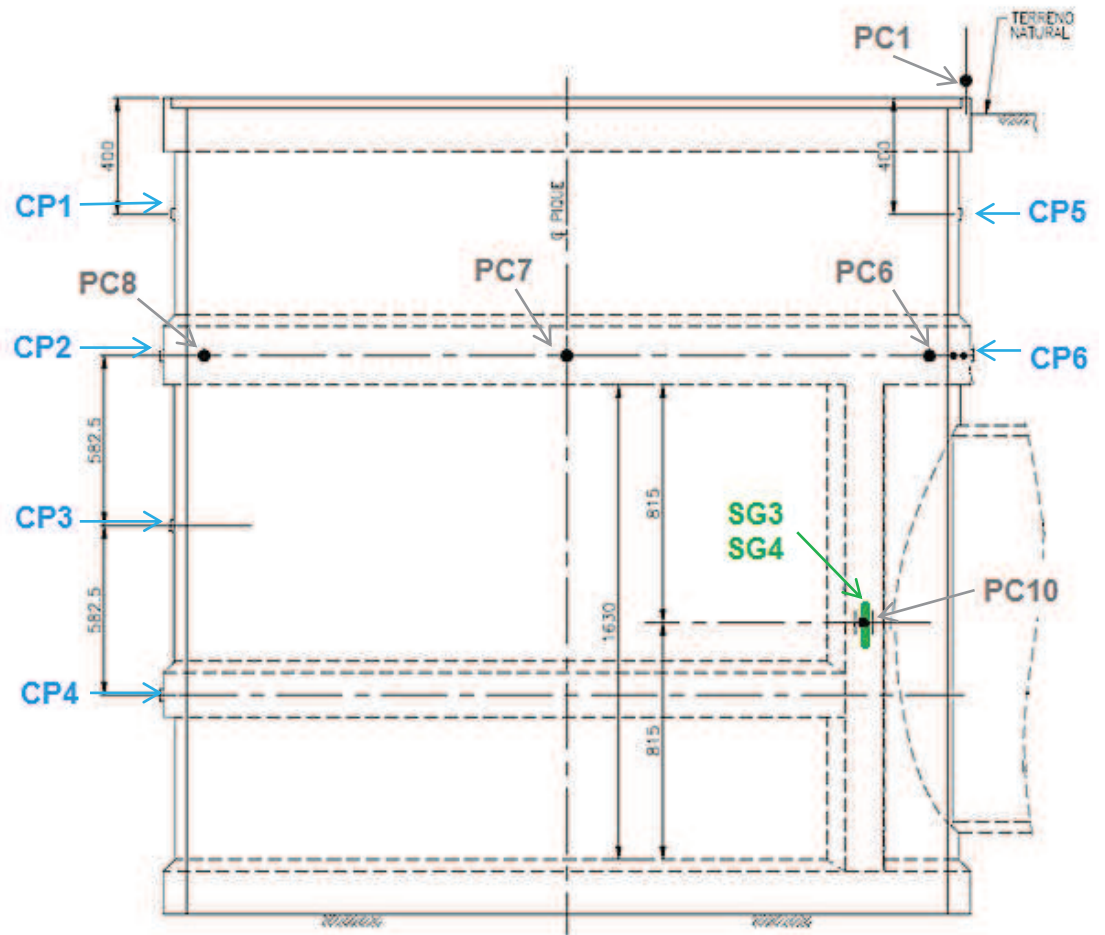
La Figura 26 y Figura 27 muestran la ubicación de los instrumentos de monitoreo en el Pique Plaza Chacabuco. La Figura 24 y Figura 25, para el Pique El Cortijo en que:

- CP: celda de presión.
- PC: punto de control de convergencia.
- SG: strain meter.

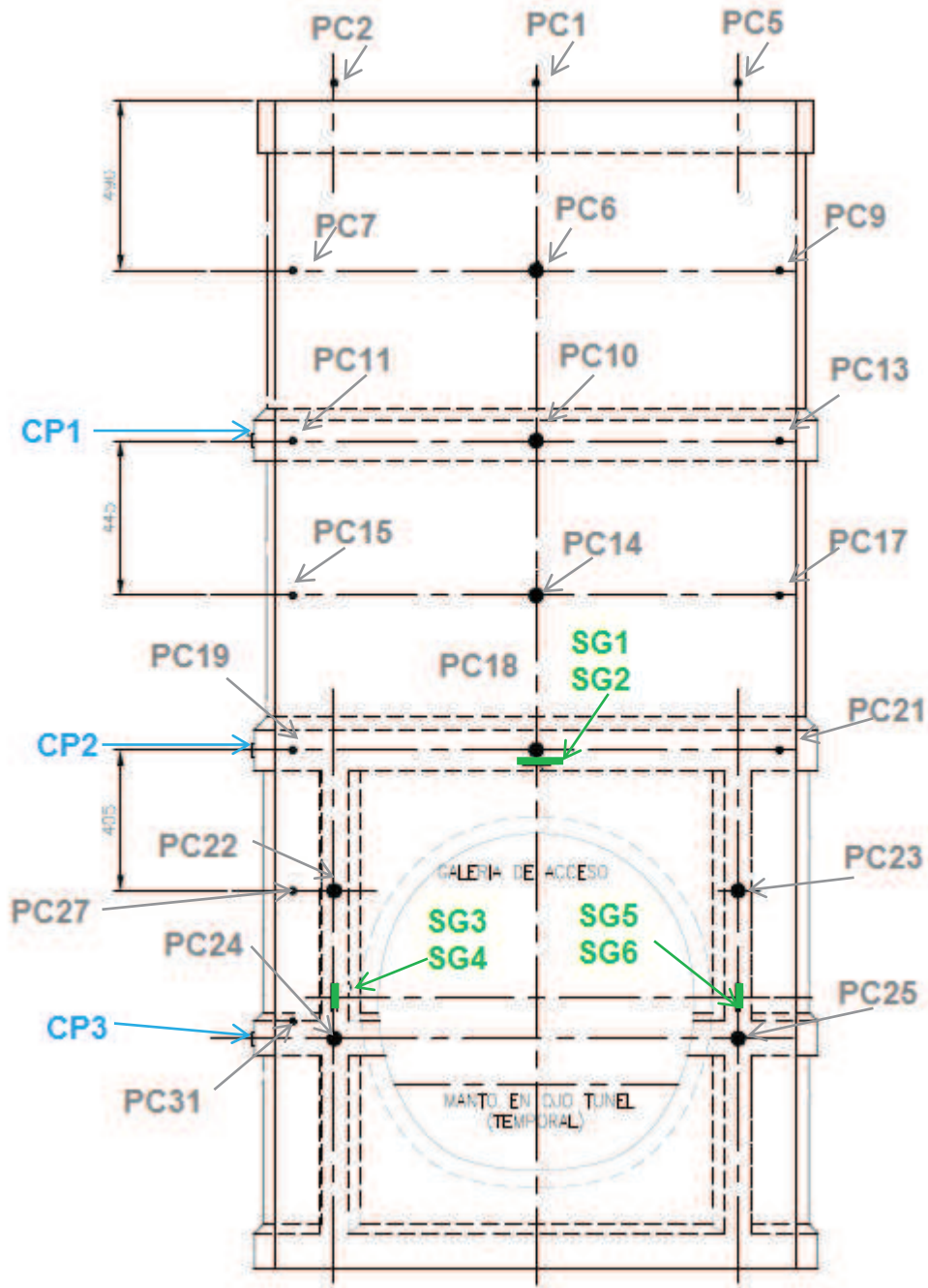
En el Anexo B, se presentan los planos que detallan cada sección del sistema de monitoreo para ambos piques.



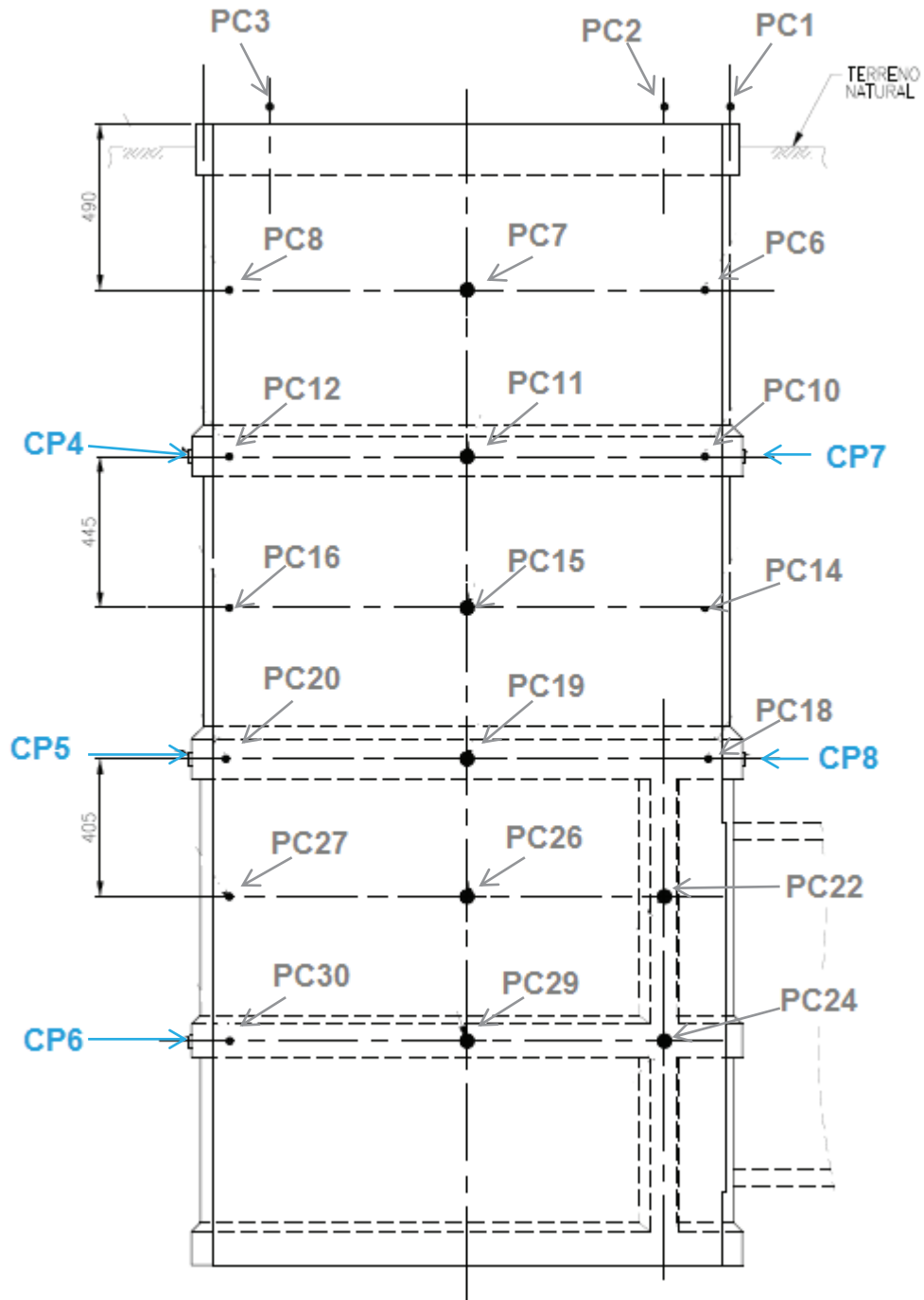
**Figura 24:** Instrumentos de Monitoreo Pique Plaza Chacabuco- Elevación frontal (Metro, 2014. H).



**Figura 25:** Instrumentos de Monitoreo Pique Plaza Chacabuco- Elevación lateral (Metro, 2014. H).



**Figura 26:** Instrumentos de Monitoreo en Pique El Cortijo - Elevación frontal (Metro, 2014. G).



**Figura 27:** Instrumentos de Monitoreo en Pique El Cortijo - Elevación lateral (Metro, 2014. G).

## 5 Resultados obtenidos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las lecturas medidas desde la fecha de instalación de los instrumentos hasta el 14 de mayo de 2014 por las celdas de presión, strain meters y por el monitoreo topográfico de convergencia. Junto con ello, se ha realizado un análisis paralelo de las actividades constructivas desarrolladas durante la excavación de ambos piques, para así obtener una adecuada interpretación de los resultados.

### 5.1 Resultados de datos medidos por celdas de presión.

Las lecturas obtenidas son leídas en la unidad electrónica “digit”, que son transformadas en unidades de presión (MPa), de acuerdo a la ecuación (5-1). Los valores A, B y C son los factores de sensibilidad polinomial entregados por SISGEO, la empresa fabricante de las celdas de presión.

$$P [MPa] = A \cdot [digit]^2 + B \cdot [digit] + C \quad (5-1)$$

Las lecturas son corregidas por temperatura, sea por condiciones ambientales o del fraguado del hormigón. La corrección se realiza según se indica en la ecuación (5-2) en donde  $P_T$  corresponde a la corrección por temperatura,  $T$  es la temperatura al momento de realizar la lectura,  $T_0$  es la temperatura de calibración y  $K$  el factor térmico informado en el certificado de calibración. De esta manera, la presión corregida por efecto de la temperatura  $P_T$ , queda expresada por la relación (5-3).

$$P_T [MPa] = (T - T_0) \cdot K \quad (5-2)$$

$$P_C [MPa] = P + P_T \quad (5-3)$$

La primera lectura, corresponde a la verificación del nivel de presurización de la celda de presión, la que debe estar dentro del rango de operación definido por el fabricante y que es particular de cada celda. La lectura “cero”  $P_0$ , o la lectura inicial de las mediciones de presión, corresponde a la medición realizada una vez fraguado el hormigón del sostenimiento que cubre la celda.

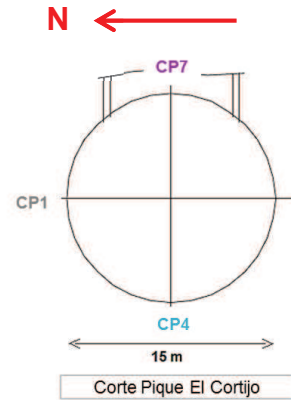
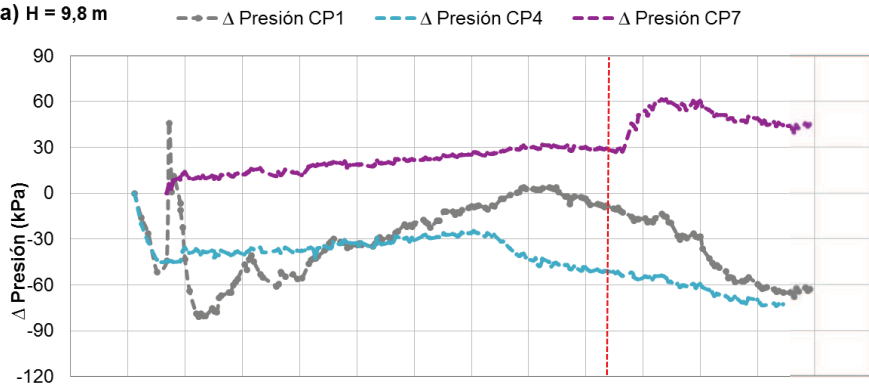
Los datos que le siguen a la lectura inicial se les debe restar la lectura cero, generando así diferencias de presión “ $\Delta$ Presión =  $P - P_0$ ”, expresada en términos relativos (a la celda) y no en términos absolutos (presión del suelo) (TUE, 2013. A). Por lo tanto, los resultados generados “ $\Delta$ Presión”, han de ser entendidos como un aumento o un descenso de la presión del suelo sobre el sostenimiento con respecto a la condición inicial. Los gráficos de las presiones medidas y corregidas por temperatura, además de las diferencias de presiones, se presentan en detalle para ambos piques en el Anexo C.

Los resultados se presentan de dos formas. En la primera, se compara la evolución en el tiempo de las diferencias de presiones medidas por las celdas de presión a un mismo nivel (igual profundidad). En el segundo caso, se realiza una comparación de celdas ubicadas sobre un mismo eje vertical, pero a distintas profundidades. A continuación se presentan los resultados para ambos piques.

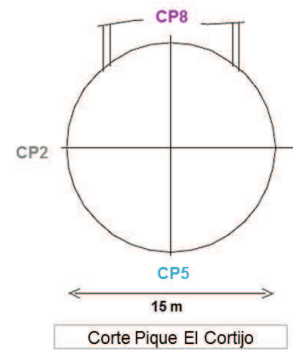
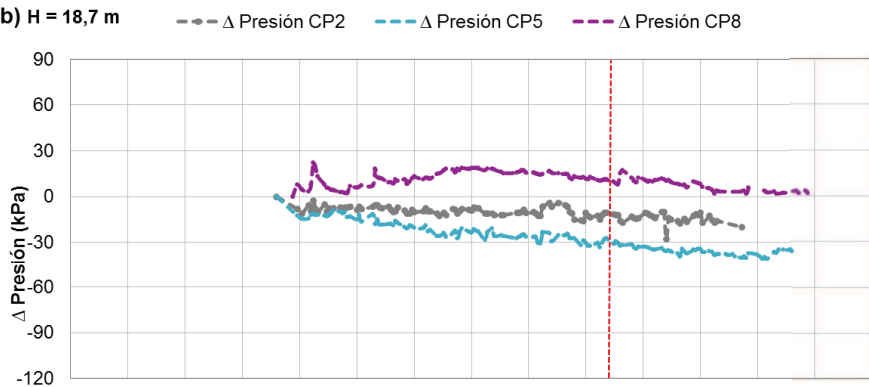
### **5.1.1 Pique El Cortijo.**

La Figura 28 muestra la variación de las presiones medidas en función del tiempo transcurrido para cada nivel analizado. El Nivel 1 se encuentra a una profundidad de 9,8 m en el primer anillo de refuerzo del pique. El Nivel 2 está a una profundidad de 18,7 m en el segundo anillo de refuerzo y el Nivel 3 está a una profundidad 26,8 m en el tercer anillo de refuerzo sobre la galería. Las líneas discontinuas de color gris, celeste, morado y naranja corresponden a las diferencias de presiones medidas por las celdas en orientación norte, poniente, oriente y sur, respectivamente. La línea discontinua de color rojo, indica el evento constructivo de la apertura de la galería, la que tiene lugar el 17 de febrero de 2014.

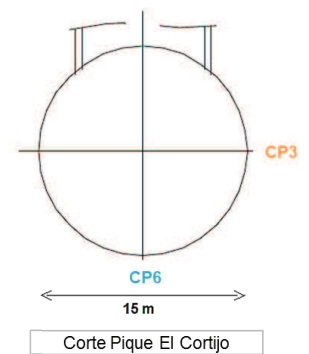
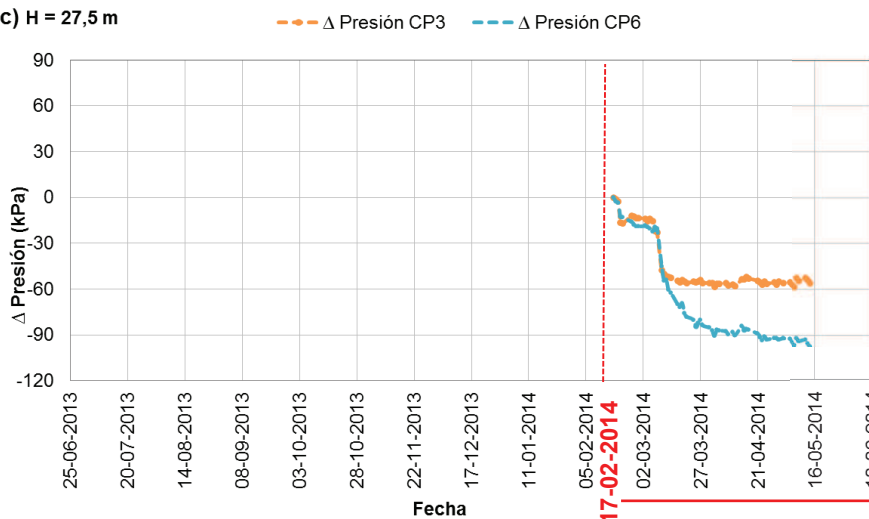
a) H = 9,8 m



b) H = 18,7 m



c) H = 27,5 m



17-02-2014 → Apertura de Galería

**Figura 28:** Diferencias de presiones en a) Nivel 1, b) Nivel 2 y c) Nivel 3 - Pique El Cortijo.



En el Nivel 1 se encuentran las celdas de presión CP1, CP4 y CP7. La celda de presión CP1 fue la primera en ser instalada y en su primer mes de funcionamiento sufre variaciones importantes de presión, descendiendo 50 kPa seguido de un ascenso de casi 100 kPa. No existen registros constructivos que expliquen dicho comportamiento. Posterior a esta fecha, la presión del suelo aumenta gradualmente hasta los 0 kPa. Desde enero de 2014 hasta el final del registro (14 de mayo de 2014), las presiones descienden alrededor de 60 kPa.

La celda de presión CP4, tras su instalación, registra un descenso de la presión del suelo de 44 kPa, teniendo un aumento paulatino de las presiones hasta diciembre de 2013, en que las presiones experimentan una disminución gradual de hasta 40 kPa.

La celda de presión CP7, está localizada sobre el eje vertical del ojo de la galería. De acuerdo a la Figura 28 a), desde su instalación hasta una fecha próxima a la apertura de la galería, se registra un aumento de las presiones alcanzando una magnitud cercana a los 30 kPa. Tras la apertura de la galería (17 de febrero de 2014), se registran presiones de aproximadamente 60 kPa, que decaen paulatinamente tras un mes del evento.

En el Nivel 2 se encuentran las celdas de presión CP2, CP5 y CP8. Las celdas de presión CP2 y CP5 registran disminución de las presiones del suelo desde su instalación a la fecha estudiada. La celda CP2 presenta un descenso de las presiones de hasta 20 kPa y la celda CP5 de 40 kPa.

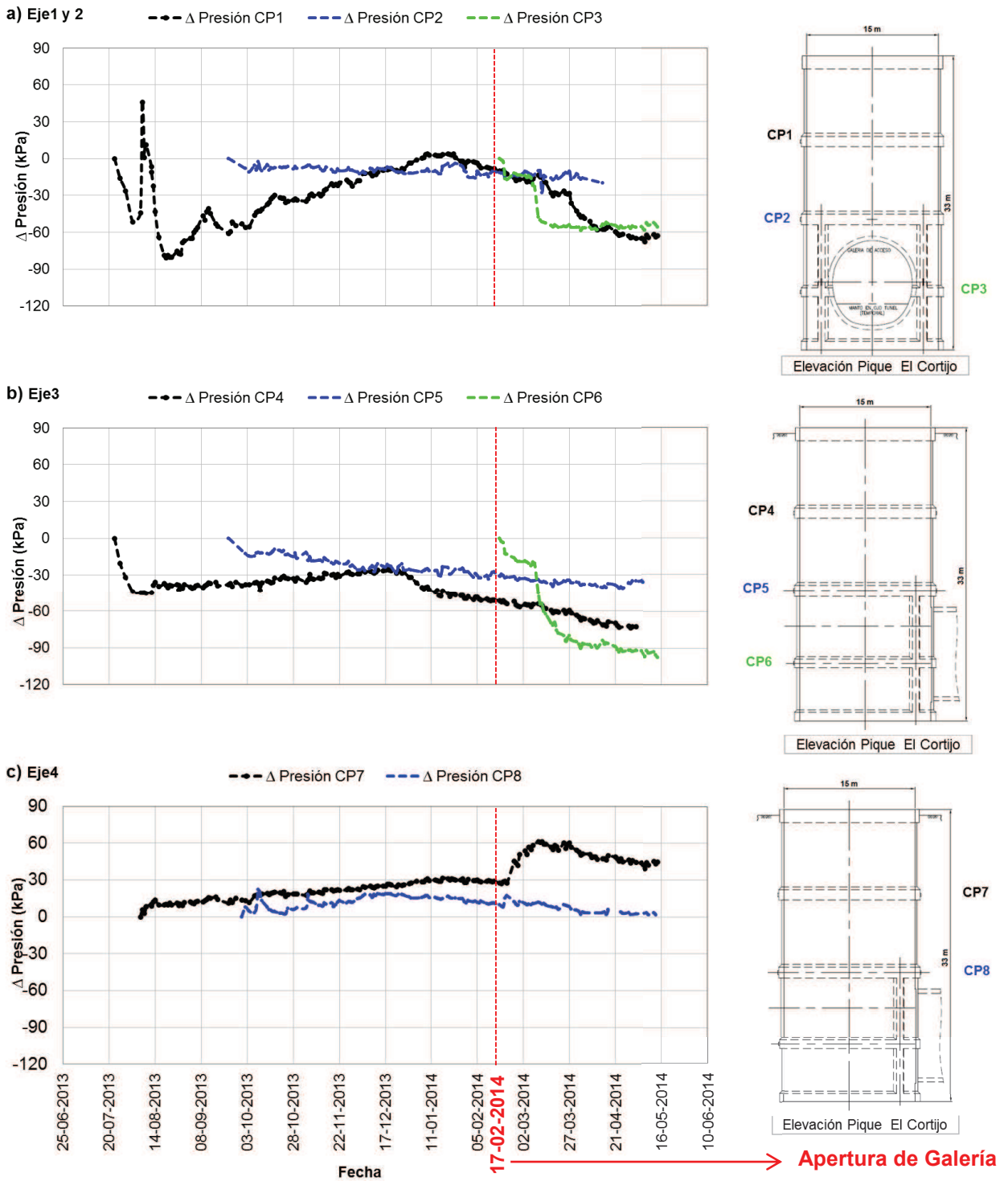
La celda de presión CP8 está localizada sobre el eje vertical del ojo de la galería. A diferencia de la celda CP7, ubicada a los 9,8 m de profundidad, la celda CP8 presenta un aumento menor de las presiones, cercano a los 10 kPa tras la apertura de la galería. Posterior a dicho evento, las presiones disminuyen y se estabilizan.

En el Nivel 3 se encuentran las celdas de presión CP3 y CP6. Ambas celdas presentan una disminución de las presiones del suelo desde su instalación. La celda CP3 registra descenso de hasta 60 kPa y la celda CP6 de 90 kPa. Hasta la fecha de análisis, la magnitud de las presiones se estabiliza.

En resumen, de la Figura 28 se observa que la zona que registra mayores presiones de suelo es la que concuerda con el eje vertical de la galería, registrándose aumentos de presión de hasta 60 kPa. La zona que registra menores presiones, corresponde a la diametralmente opuesta al eje vertical de la galería, y es en donde se registran los mayores descensos de las presiones del suelo, de hasta 90 kPa.

La Figura 29 muestra las variaciones de presiones en todos los ejes del pique. El Eje 1, Eje 2, Eje 3 y Eje 4 corresponden al costado norte, sur, poniente y oriente del pique, respectivamente. Estas se representan con líneas discontinuas de color negro para el Nivel 1, azul para el Nivel 2 y verde para Nivel 3.

De ella se observa principalmente que un evento importante, como es la apertura de la galería, provoca aumento en las presiones registradas en el sector localizado por sobre el eje vertical de la galería (Figura 29 c), constituyendo la zona más solicitada del sostenimiento del pique. Las celdas de presión más profundas (nivel 3), son las que experimentan una mayor disminución de las presiones del suelo registradas. Las celdas de presión ubicadas en el nivel 2, sobre la galería, son las que presentan menos variaciones de las presiones de suelo medidas.



**Figura 29:** Diferencias de presiones en a) Eje 1 y 2, b) Eje 3 y c) Eje 4 - Pique El Cortijo.

### 5.1.2 Pique Plaza Chacabuco

La Figura 30 muestra la variación de las presiones medidas en función del tiempo transcurrido para cada nivel analizado. El Nivel 1 se encuentra a una profundidad de 5 m, en el manto del pique. El Nivel 2 está a una profundidad de 9 m, en el primer anillo de refuerzo sobre la galería. El Nivel 3 está a una profundidad 15 m, en el manto del pique y el Nivel 4 se encuentra en el segundo anillo de refuerzo. Las líneas discontinuas de color celeste, morado y gris corresponden a las diferencias de presiones medidas por las celdas en orientación oriente, poniente y sur, respectivamente. La línea discontinua de color rojo, indica el evento constructivo de la apertura de la galería que tiene lugar el 4 de marzo de 2014.

En el Nivel 1 se encuentran las celdas de presión CP1, CP5 y CP7. La celda de presión CP1 presenta una descenso de la presión de aproximadamente 40 kPa tras su instalación, luego de ello presenta un ascenso gradual de las presiones registradas. Hasta la fecha de los registros (14 de mayo de 2014), la celda vuelve a disminuir sus presiones en torno a 40 kPa.

La celda de presión CP5 se encuentra sobre el eje vertical del ojo de la galería. Los registros presentan fluctuaciones de hasta 35 kPa entre una medición y otra. En la Figura 31 se muestra las diferencias de presiones medidas entre el 29 de octubre de 2013 y el 4 de noviembre del 2013. En ella se observa un descenso de presiones de 14 kPa en el transcurso de un día y un ascenso de las presiones de 46 kPa en cinco días. Estas altas variaciones registradas en un corto intervalo de tiempo no se observan en otras celdas, por lo que se puede deducir que el sector poniente del pique, podría estar siendo solicitado por cargas externas tales como la posición de la grúa, camiones cargados con material, zona de depósito de la marina, etc. situaciones que podrían verificarse con algún registro de obra. Cabe destacar que posterior a la fecha de apertura de la galería (4 de marzo de 2014), se manifiesta un descenso de 115 kPa de la presión medida. Debido a las fluctuaciones en las mediciones que presenta la celda durante todo el periodo, este descenso importante de las presiones no puede atribuirse directamente a dicho evento.

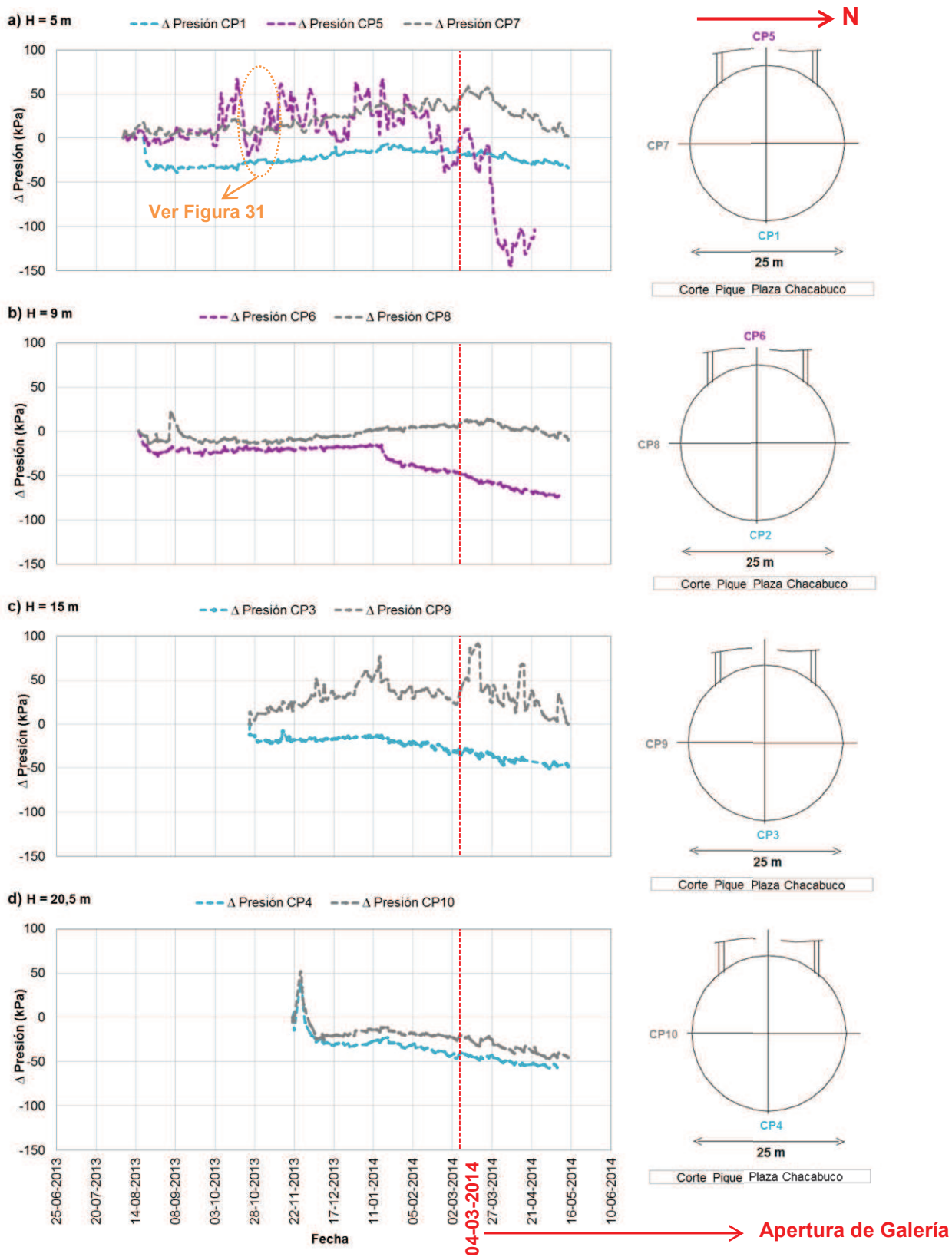
La celda de presión CP7, registra un crecimiento gradual de las presiones del suelo alcanzando un aumento de hasta 40 kPa aproximadamente. Luego de la apertura de la galería, se registran las presiones más altas, en torno a los 55 kPa, tras este evento las presiones del suelo descienden hasta los 0 kPa.

En el Nivel 2 se encuentran las celdas de presión CP2, CP6 y CP8. En la Figura 30 b) no se presentan las mediciones de la celda CP2, pues necesita otro rango de valores, los que se muestran en la Figura 32. En ella se observa que las presiones registran un aumento de hasta 430 kPa, el que no puede ser explicado por una sollicitación extra a nivel de superficie pues la celda de presión CP1, localizada en el mismo eje, pero a un nivel más superficial (Nivel 1), no manifiesta dicho comportamiento.

La celda de presión CP6 se encuentra sobre el eje vertical del ojo de la galería. Tras su instalación sufre un descenso de las presiones medidas en torno a los 30 kPa, a partir del cual sus presiones crecen de manera gradual. Desde el 14 de enero de 2014, las presiones descienden bruscamente alcanzando una disminución de hasta 72 kPa a partir de su instalación. La celda de presión CP8 mantiene un comportamiento estable desde su instalación, en que las presiones aumentan hasta los 14 kPa y luego disminuyen en torno a los 0 kPa.

En el Nivel 3 se encuentran las celdas de presión CP3 y CP9. La celda CP3 registra variaciones de presiones estables, alcanzando a la fecha de 14 de mayo de 2014, un descenso en torno a los 44 kPa. Por otra parte, la celda de presión CP9 presenta variadas fluctuaciones durante todo el registro y su última lectura es 0 kPa aproximadamente.

En el Nivel 4 se encuentran las celdas de presión CP4 y CP10. Ambas celdas registran variaciones de presiones similares. Tras la instalación alcanzan su máximo valor en torno a los 51 kPa, luego de ello las presiones disminuyen registrando -56 kPa.



**Figura 30:** Diferencias de presiones en a) Nivel 1, b) Nivel 2, c) Nivel 3 y d) Nivel 4 - Pique Plaza Chacabuco.

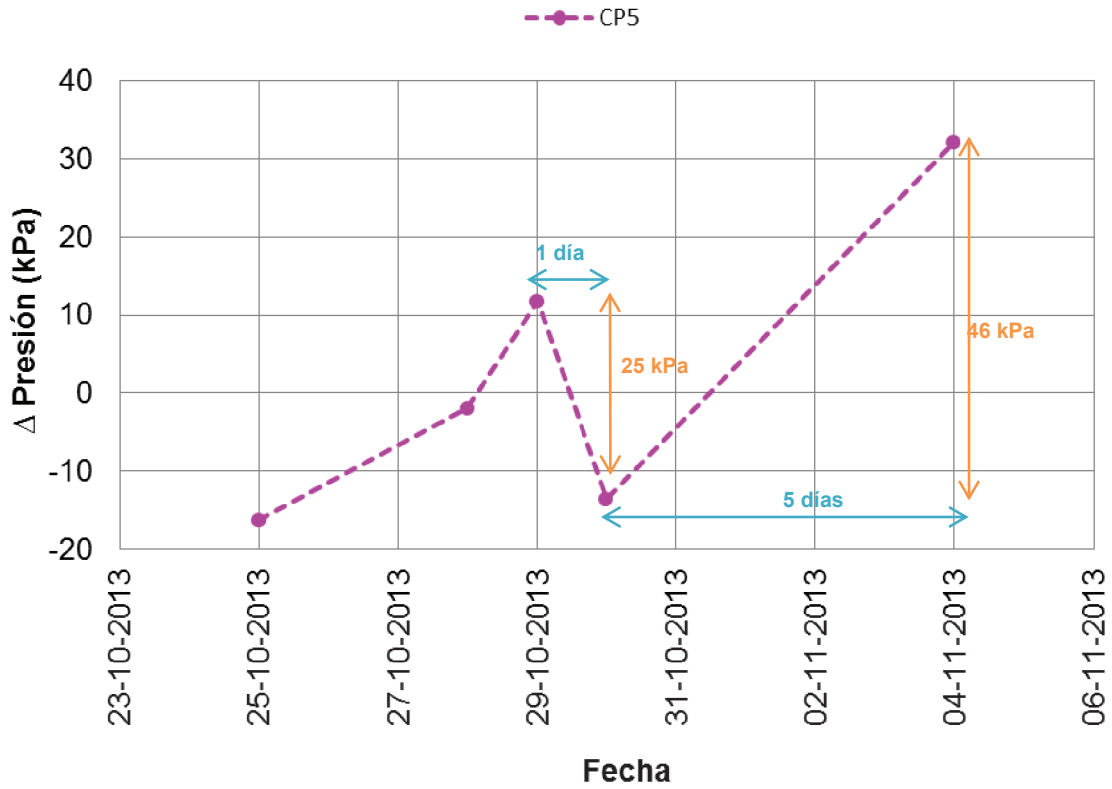


Figura 31: Diferencia de presión en Nivel 1, celda CP5 – Pique Plaza Chacabuco.

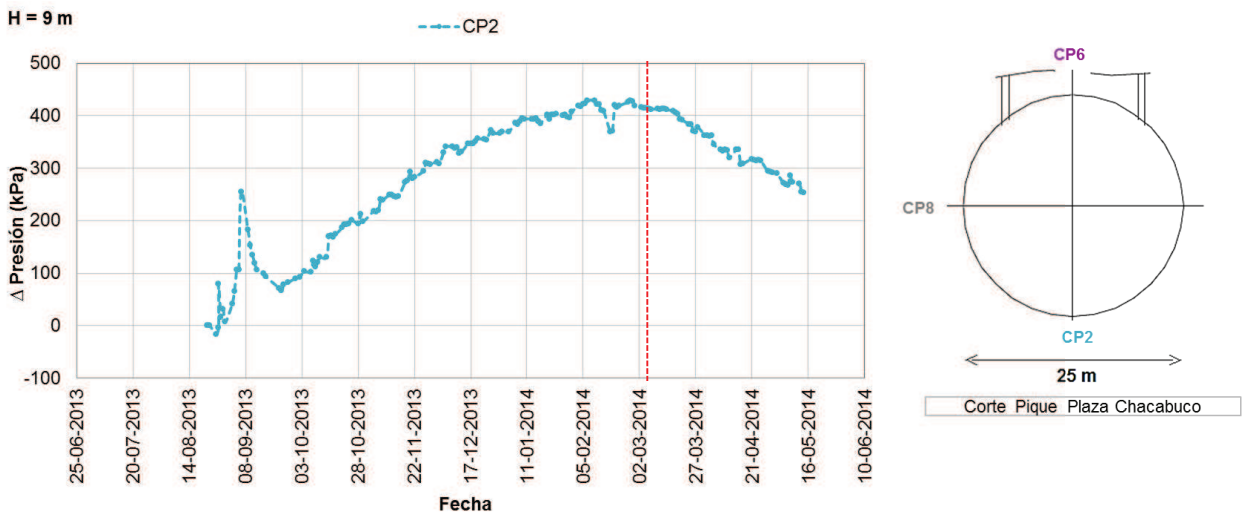
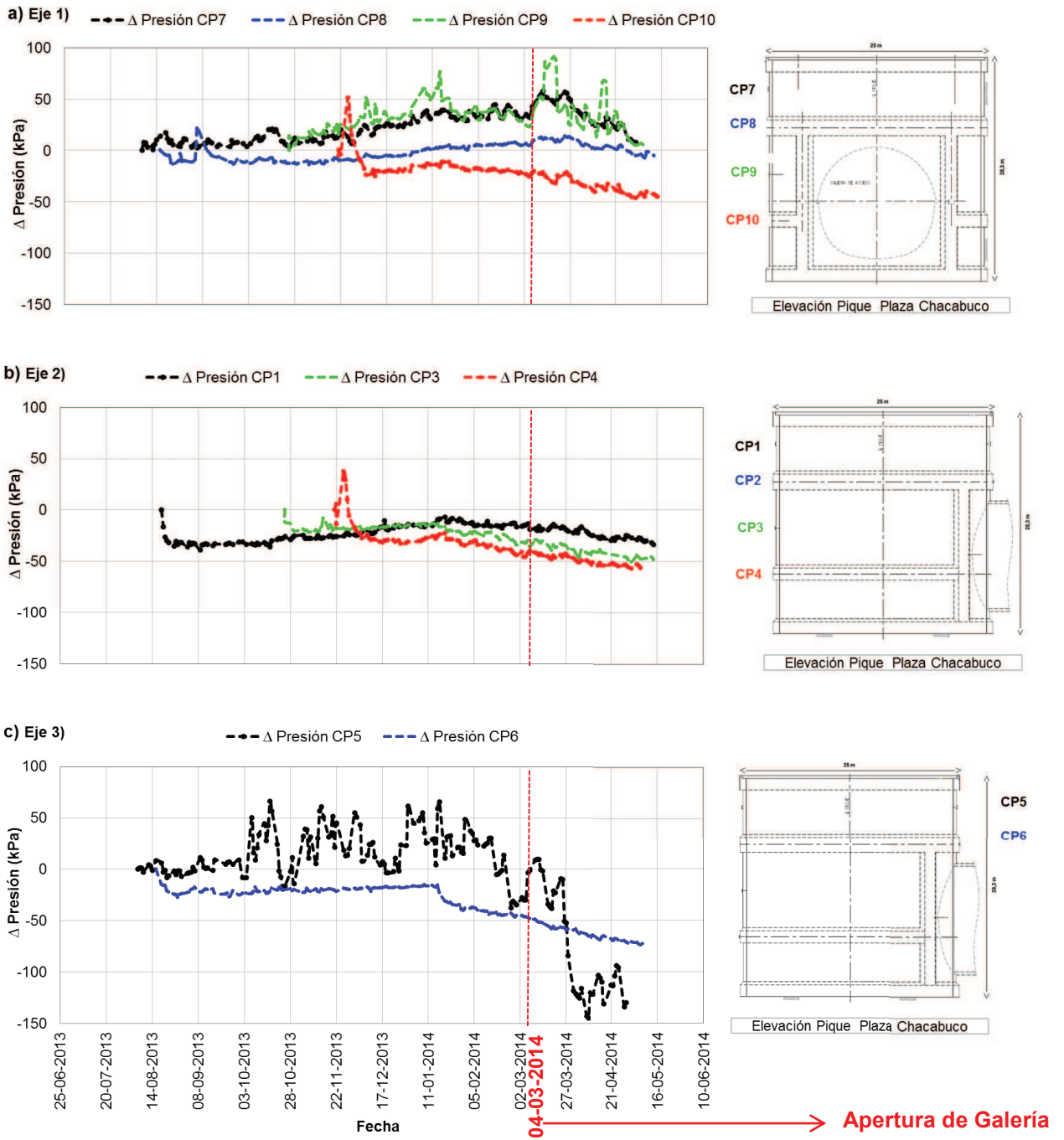


Figura 32: Diferencia de presión en Nivel 2, celda CP6 – Pique Plaza Chacabuco.

La Figura 33 muestra las variaciones de presiones en todos los ejes del pique. El Eje 1, Eje 2 y Eje 3 corresponden al costado sur, oriente y poniente del pique, respectivamente. Estas se representan con líneas discontinuas de color negro para el Nivel 1, azul para el Nivel 2, verde para Nivel 3 y roja en el Nivel 4.

En los tres ejes se observa que las celdas de presión localizadas en el manto del pique y en el costado sur, CP7 y CP9, manifiestan mayores fluctuaciones de las diferencias de presiones medidas. No se observa una influencia clara de la apertura de la galería en las lecturas, como ocurre en el Pique El Cortijo, sin embargo, cabe mencionar que en el Pique Plaza Chacabuco, la galería fue excavada tras ser alcanzada la profundidad total del pique, mientras que en el Pique El Cortijo, la excavación de la galería comenzó deteniendo el avance de la excavación del pique





**Figura 33:** Diferencias de presiones en a) Eje 1, b) Eje 2 y c) Eje 3 - Pique Plaza Chacabuco.

## 5.2 Resultados de datos medidos por strain meters.

Las lecturas obtenidas por los strain meters son leídas en unidades de deformación unitaria “ $\epsilon$ ” expresada en  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Los datos presentados a continuación en gráficos, han sido normalizados por la deformación unitaria escogida como inicial, la que es fijada en cero.

El criterio utilizado para escoger la deformación unitaria inicial es considerar la estabilidad de las mediciones iniciales y considerar el fraguado del sostenimiento ya aplicado, pues a partir de ese momento, el elemento considerado comienza a comportarse como un elemento estructural.

Los gráficos a continuación presentan las deformaciones unitarias registradas por el strain meter interior instalado en la armadura más cercana de la cara libre del revestimiento y el strain meter exterior instalado en la armadura más cercana a la cara en contacto con el suelo, disposición explicada en la Figura 20. En esta sección los strain meters interior y exterior son presentados con una línea discontinua de color celeste y verde, respectivamente.

Cabe mencionar que las columnas se construyen a medida que aumenta la profundidad de excavación del pique. Por lo tanto, el peso propio de las columnas va aumentando a medida que se construye el pique. La altura total de la columna se alcanza en abril de 2014 para el Pique El Cortijo y en febrero de 2014 para el Pique Plaza Chacabuco.

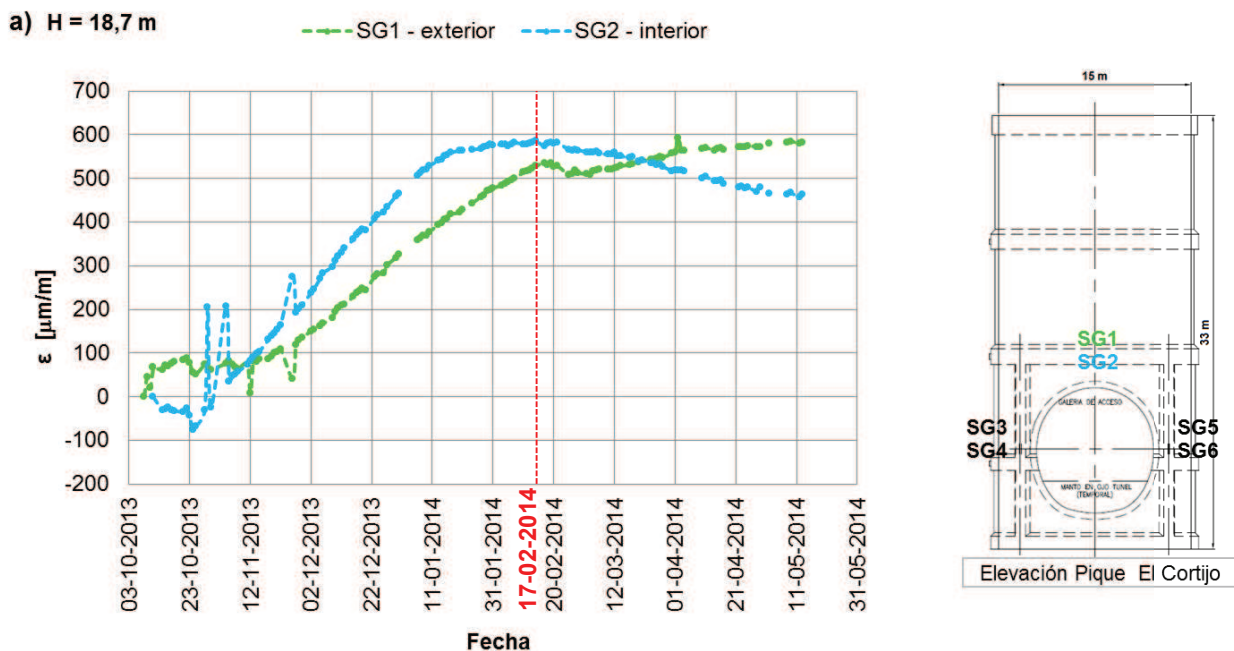
Además, se considera que los valores positivos corresponden a extensión y los valores negativos a contracción.

### 5.2.1 Pique El Cortijo.

La Figura 34 presenta las lecturas medidas por el strain meter interior SG1 y exterior SG2, localizados en la viga de refuerzo superior sobre el eje central de la galería, a una profundidad aproximada de 18,7 m.

El strain meter SG2 (interior) presenta un comportamiento mayoritariamente extensivo desde su instalación hasta febrero de 2014 que coincide con la apertura de la galería. A partir de ese momento las mediciones decrecen, manifestando un comportamiento contractivo.

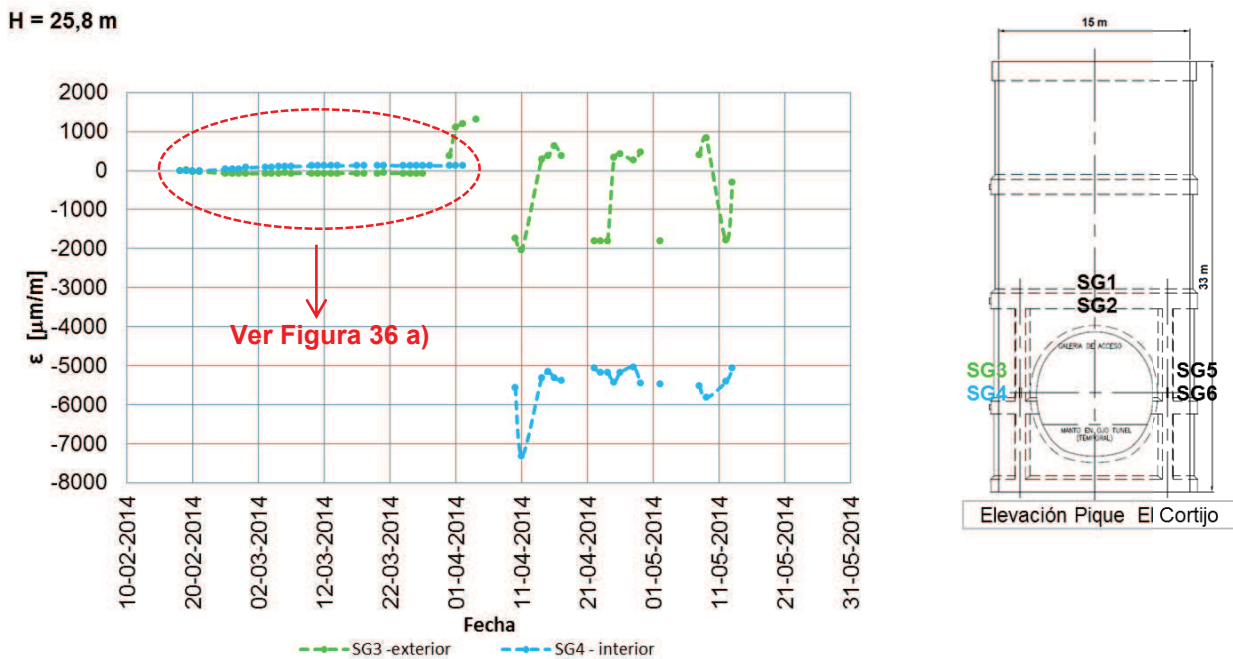
El strain meter SG1 (exterior) muestra un comportamiento similar al strain meter SG2 desde su instalación hasta febrero de 2014, sin embargo la tasa de crecimiento de deformaciones unitarias es menor. Posterior a la apertura de la galería, esta tasa aumenta, siguiendo con un comportamiento extensivo.



**Figura 34:** Deformación unitaria en viga sobre eje de galería – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión).

La Figura 36 muestra las lecturas medidas por los strain meters localizados en la columna izquierda (costado Norte) del marco que confina el ojo de la galería, a una profundidad aproximada de 25,8 m. Desde su instalación hasta el 28 de marzo de 2014, las deformaciones unitarias se mantienen entre un rango de -100 y 150  $\mu\text{m}/\text{m}$ , en que SG3 (exterior) manifiesta un comportamiento contractivo y SG4 (interior) uno extensivo. Posterior a esta fecha las deformaciones unitarias se ven afectadas por grandes variaciones, SG1 varía entre los -2000 y 1300  $\mu\text{m}/\text{m}$ , y SG2 entre los -7300 y -5074  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

A partir del 28 de marzo de 2014, la hoja de registros emitida por la unidad de monitoreo a cargo de la lectura de datos, presenta comentarios en las lecturas tomadas. Ejemplo de estos comentarios mencionados en la hoja de registro entregada por la Unidad de Monitoreo (GEODATA), son: “medición a controlar, cable cubierto parcialmente con marina”, “SG4 cable cortado”, “no se permite medir”, “cable ubicado en zona de peligro”. Estas situaciones ocurridas en terreno pueden explicar de alguna manera las variaciones de las deformaciones medidas, aludiendo a un desperfecto del instrumento.

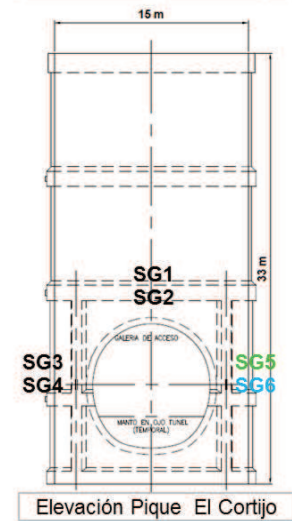
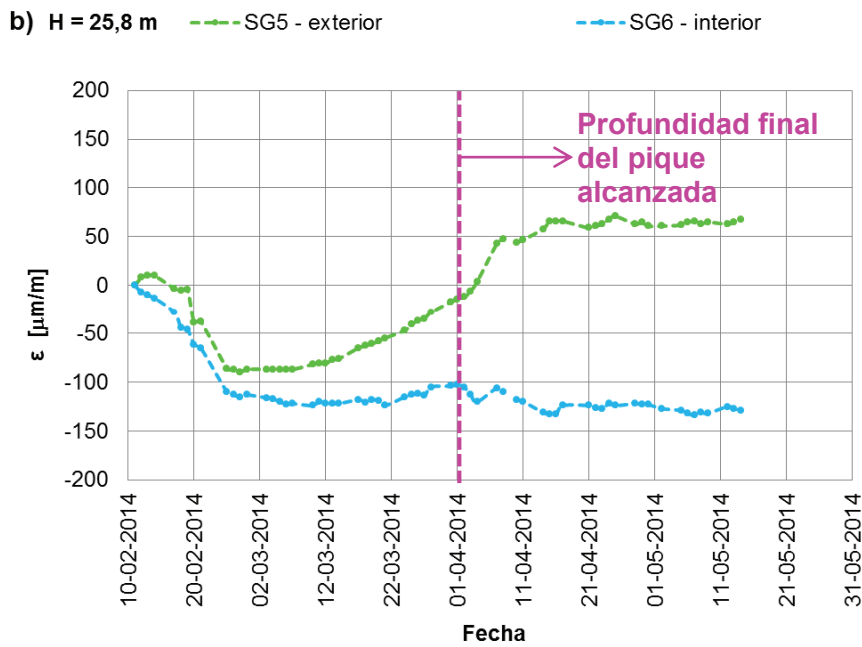
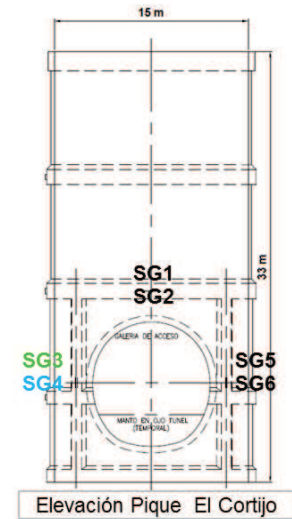
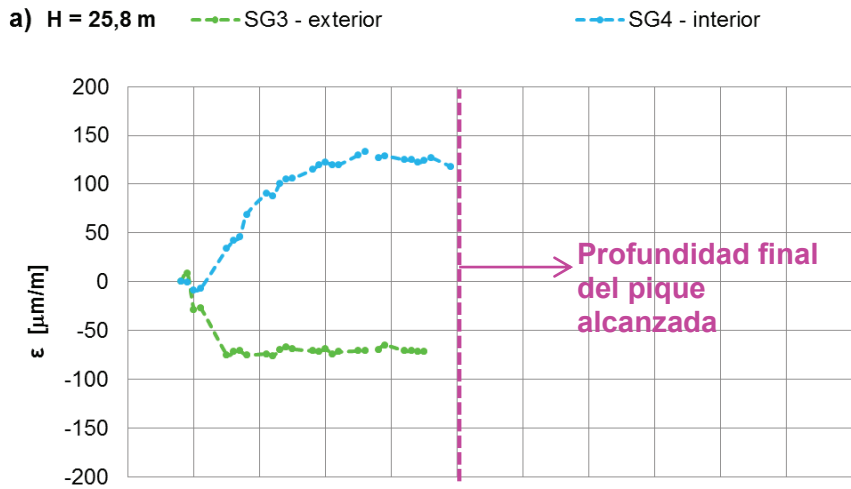


**Figura 35:** Deformación unitaria en columna izquierda (costado Norte) – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión).

La Figura 36 a) muestra la deformación unitaria medida en la columna izquierda (costado norte del ojo de la galería) hasta el 28 de marzo de 2014. La Figura 36 b) muestra la deformación unitaria de la columna derecha hasta el final del registro (14 de mayo de 2014).

Los strain meters SG5 y SG6 se localizan en la columna derecha en el costado Sur del pique a una profundidad aproximada de 25,8 m. Durante el primer mes de instalación, ambos strain meters presentan un comportamiento similar y contractivo. A partir de marzo de 2014, SG5 (exterior) manifiesta extensión alcanzando hasta aproximadamente los 70  $\mu\text{m}/\text{m}$ , en que se estabilizan las mediciones. El strain meter SG6 (interior) presenta un comportamiento contractivo en todo su registro alcanza hasta los -132  $\mu\text{m}/\text{m}$ , en que se estabilizan las lecturas.

En la Figura 36 también se observa la línea punteada de color rosado. Esta indica la fecha en que se alcanza la profundidad total del pique. Es posible distinguir comportamientos distintos de las lecturas obtenidas anteriores a abril de 2014, pues la columna estaba en etapa de construcción.

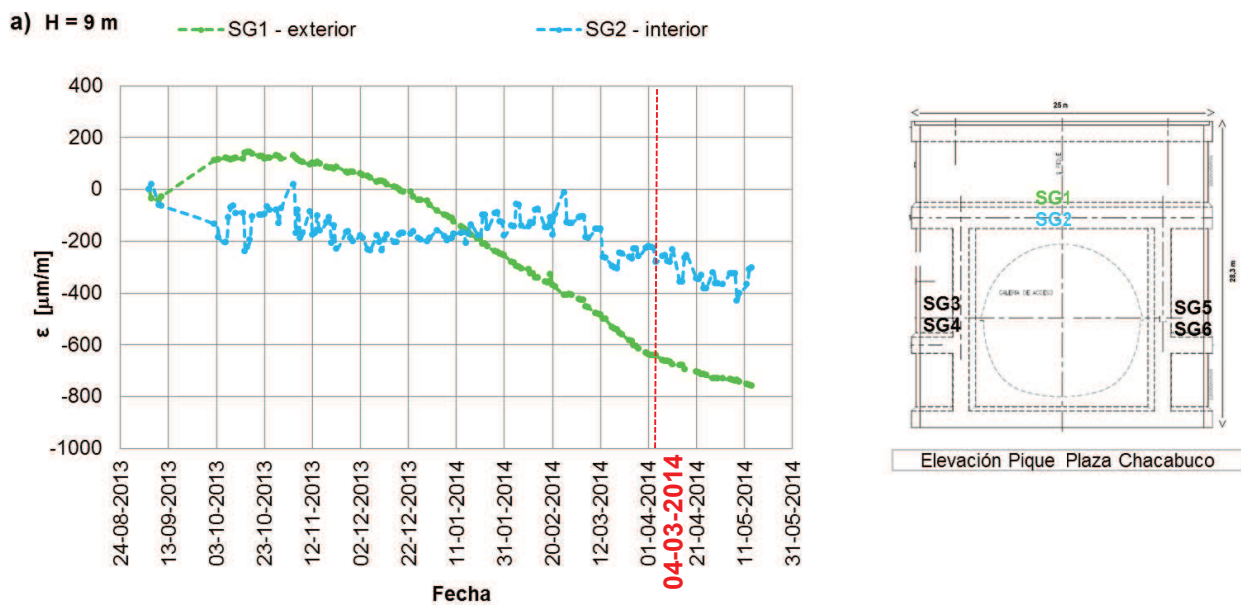


**Figura 36:** Deformación unitaria en columna a) izquierda (costado Norte) y b) derecha (costado Sur) – Pique El Cortijo (valores positivos corresponden a extensión).

## 5.2.2 Pique Plaza Chacabuco

La Figura 37 presenta las lecturas medidas por los strain meters exterior SG1 e interior SG2, localizado en la viga de refuerzo superior sobre el eje central de la galería, a una profundidad aproximada de 9 m.

El strain meter SG1 (exterior) presenta deformaciones unitarias decrecientes a partir de noviembre de 2013 alcanzando valores en torno a los  $-800 \mu\text{m/m}$ . El strain meter SG2 (interior) muestra un comportamiento tanto extensivo y contractivo a lo largo de todo el registro, sin embargo a partir de marzo de 2014, disminuyen las deformaciones unitarias alcanzando registros de hasta  $-400 \mu\text{m/m}$ .



**Figura 37:** Deformación unitaria en viga sobre eje de galería – Pique Plaza Chacabuco (valores positivos corresponden a extensión).

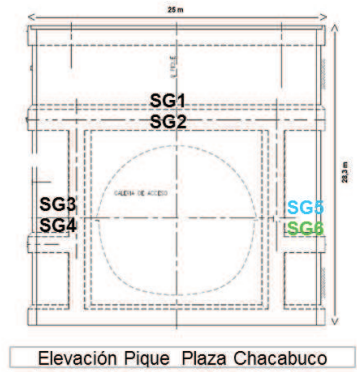
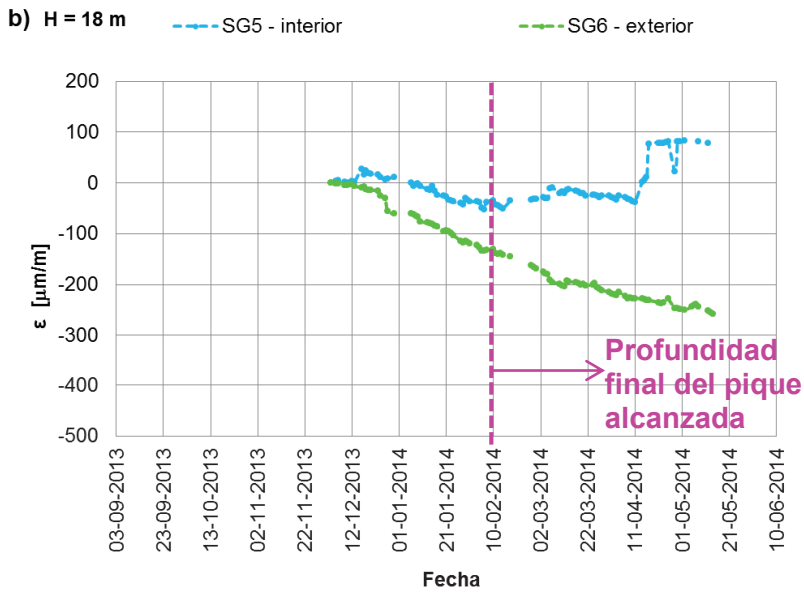
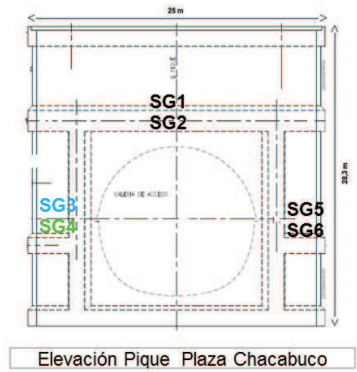
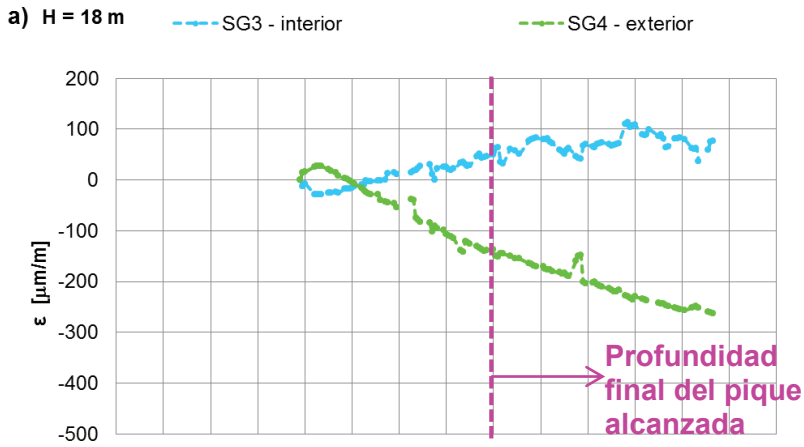
La Figura 38 muestra las lecturas medidas por los *strain meters* localizados en las columnas del marco que confina el ojo de la galería, a una profundidad aproximada de 18 m.

En la Figura 38 a) se observa la deformación unitaria medida en la columna izquierda (costado Norte) por los strain meters SG3 (interior) y SG4 (exterior). SG3 tiene un comportamiento extensivo durante todo el registro alcanzando valores en torno a los 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Por el contrario, SG4 muestra un comportamiento contractivo con valores cercanos a los -250  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En la Figura 38 b) se muestra la deformación unitaria medida en la columna derecha (costado Sur) por los strain meters SG5 (interior) y SG6 (exterior). SG5 no muestra una tendencia clara en su comportamiento, pero a partir del 11 de abril de 2014 las deformaciones unitarias aumentan alcanzando deformaciones de hasta 83  $\mu\text{m}/\text{m}$ . SG6 presenta un comportamiento contractivo durante todo el registro alcanzando aproximadamente -260  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

En la Figura 38 también se observa la línea punteada de color rosado. Esta indica la fecha en que se alcanza la profundidad total del pique. Es posible distinguir comportamientos distintos de las lecturas obtenidas anteriores a febrero de 2014, pues la columna estaba en etapa de construcción.





**Figura 38:** Deformación unitaria en columnas – Pique Plaza Chacabuco (valores positivos corresponden a extensión).

### **5.3 Resultados de datos medidos por el monitoreo topográfico de convergencia.**

Los datos medidos por el monitoreo topográfico de convergencia entregan las coordenadas Este y Norte de los prismas localizados en el interior del pique, los que están referenciados a un sistema de coordenadas local, propio de cada medición. A partir de una lectura inicial se obtienen diferencias de desplazamientos radiales.

Un desplazamiento radial positivo, indica un desplazamiento hacia el suelo, mientras que un desplazamiento negativo corresponde a un desplazamiento hacia el interior del pique. Una localización más detallada de los puntos de control en los piques, se puede ver en el Anexo B.

Cabe destacar que en las siguientes secciones se presentan los gráficos de desplazamientos radiales durante todo el registro (hasta el 14 de mayo del 2014), sin embargo, es posible distinguir dos periodos. El Periodo A abarca desde el inicio de las mediciones (13 de mayo de 2013 en Pique El Cortijo y 8 de julio de 2013 en Pique Plaza Chacabuco) hasta el 27 de septiembre de 2013. El Periodo B está entre el 30 de octubre de 2013 hasta el final del registro. El tiempo transcurrido entre ambos periodos no cuenta con mediciones. Este periodo coincide con el cambio de la entidad a cargo del monitoreo topográfico, pasando de la empresa AMEC a la empresa GEODATA.

#### **5.3.1 Pique El Cortijo.**

El Pique El Cortijo consta de cinco secciones de monitoreo a distintas profundidades. La Figura 39 y la Figura 40 muestran los desplazamientos radiales medidos en cada una de las secciones en el Periodo A y Periodo B, respectivamente. Las líneas discontinuas de color rojo, verde, azul, celeste y morado presentan los desplazamientos radiales medidos en los puntos de control PC1, PC2, PC3, PC4 y PC5, respectivamente. La línea continua de color negro, expone la precisión del instrumento, dada por  $\pm 1$  mm.

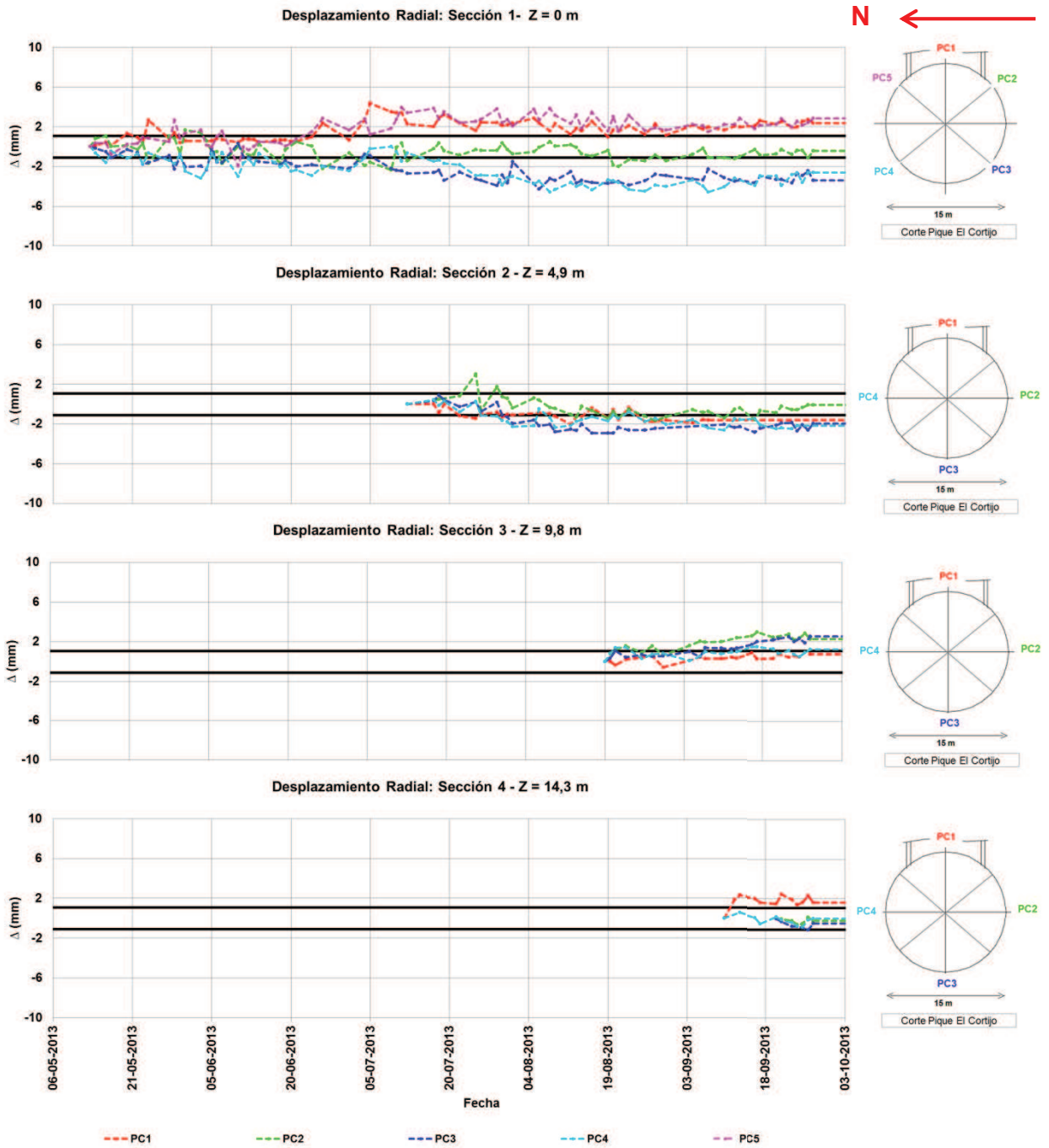
La sección 1 corresponde al monitoreo realizado en el brocal del pique. Durante el Periodo A tanto PC1 como PC5 presentan un desplazamiento radial positivo (hacia el suelo), alcanzando un valor máximo de  $4,4 \pm 1$  mm. PC2 puede considerarse dentro del rango de precisión de medición, sin manifestar un claro desplazamiento. PC3 y PC4 presentan un desplazamiento radial negativo (hacia el interior del pique), alcanzando un valor máximo de  $-4,6 \pm 1$  mm. Durante el Periodo B, los puntos de control PC1 y PC5 disminuyen su desplazamiento radial acercándose a la precisión de medición, mientras que PC2, PC3 y PC4 presentan un desplazamiento radial negativo, alcanzando un valor máximo de  $-7,7 \pm 1$  mm.

La sección 2 corresponde al monitoreo realizado al manto del pique a una profundidad de 4,9 m. En el Periodo A todos los puntos muestran un desplazamiento radial negativo (hacia el interior del pique), registrando un valor promedio de  $-2 \pm 1$  mm. Durante el Periodo B, PC3 y PC4 aumentan su deformación alcanzando los  $-7,6 \pm 1$  mm.

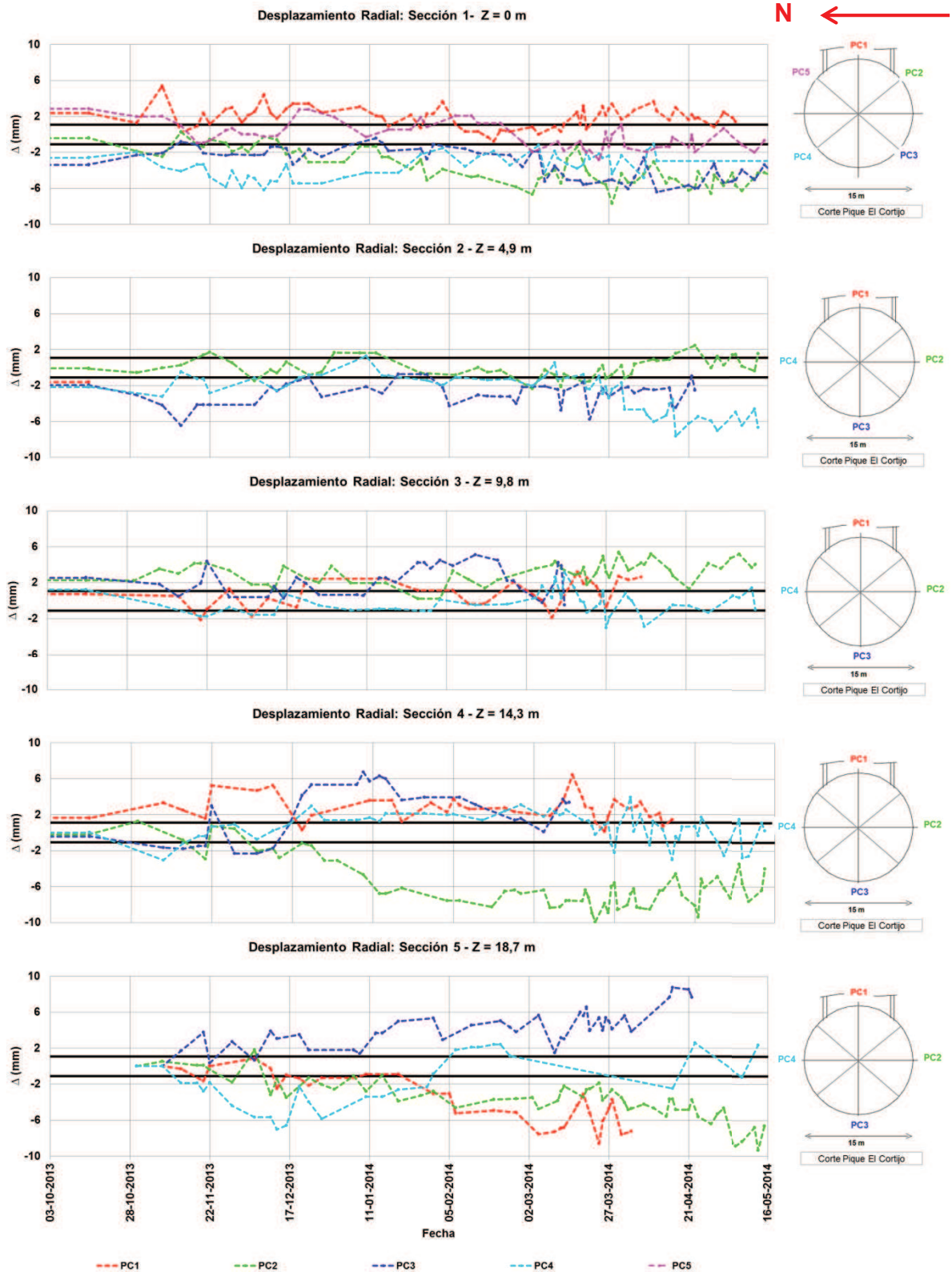
La sección 3 corresponde al monitoreo realizado en el primer anillo de refuerzo del pique a una profundidad de 9,8. Durante el Periodo A, los puntos PC2 y PC3 presentan un desplazamiento radial positivo (hacia el suelo) de  $3 \pm 1$  mm. Los demás puntos registran pequeños desplazamientos de hasta  $1,5 \pm 1$  mm. En el Periodo B, el mayor desplazamiento lo registra PC2 con  $5,2 \pm 1$  mm.

La sección 4 corresponde al monitoreo realizado en el manto del pique a una profundidad de 14,3 m. En el Periodo A se distingue un desplazamiento radial positivo (hacia el suelo) solo en el PC1 de  $2,4 \pm 1$  mm. Durante el Periodo B, los desplazamientos registrados son mayores. PC1, PC3 y PC4 presentan un desplazamiento positivo con un máximo de  $6,4 \pm 1$  mm, mientras que PC2 presenta un desplazamiento negativo de hasta  $-10 \pm 1$  mm.

La sección 5 localizada a una profundidad de 18,7 m en el segundo anillo de refuerzo. Sus mediciones quedan registradas durante el Periodo B. PC3 alcanza un desplazamiento de hasta  $8,7 \pm 1$  mm. PC1, PC2 y PC3 presentan una deformación negativa con un valor máximo de  $-9,3 \pm 1$  mm.



**Figura 39:** Desplazamientos radiales medidos en Pique El Cortijo- Periodo A.



**Figura 40:** Desplazamientos radiales medidos en Pique El Cortijo- Periodo B.

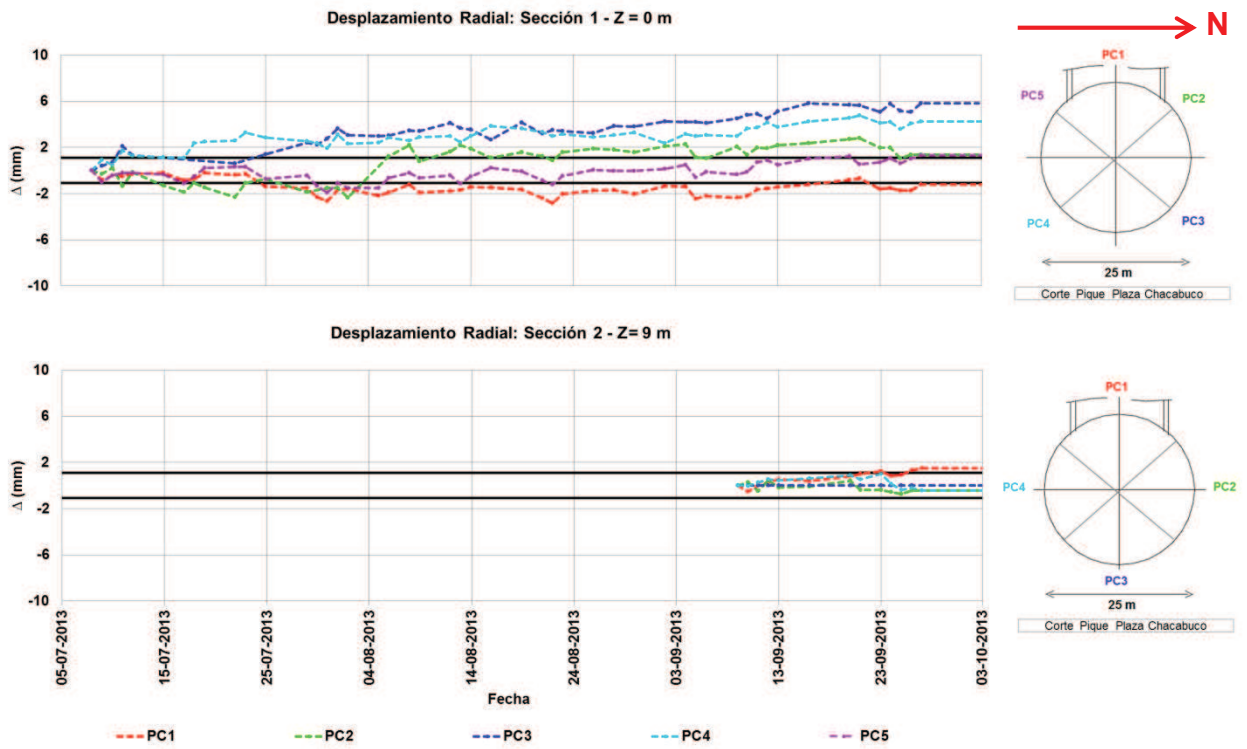
### 5.3.2 Pique Plaza Chacabuco.

El Pique Plaza Chacabuco consta de tres secciones de monitoreo a distintas profundidades. La Figura 41 y la Figura 42 muestran los desplazamientos radiales medidos en cada una de las secciones en el Periodo A y Periodo B, respectivamente. Las líneas discontinuas de color rojo, verde, azul, celeste y morado presentan los desplazamientos radiales medidos en los puntos de control PC1, PC2, PC3, PC4 y PC5, respectivamente. La línea continua de color negro, expone la precisión del instrumento, dada por  $\pm 1$  mm.

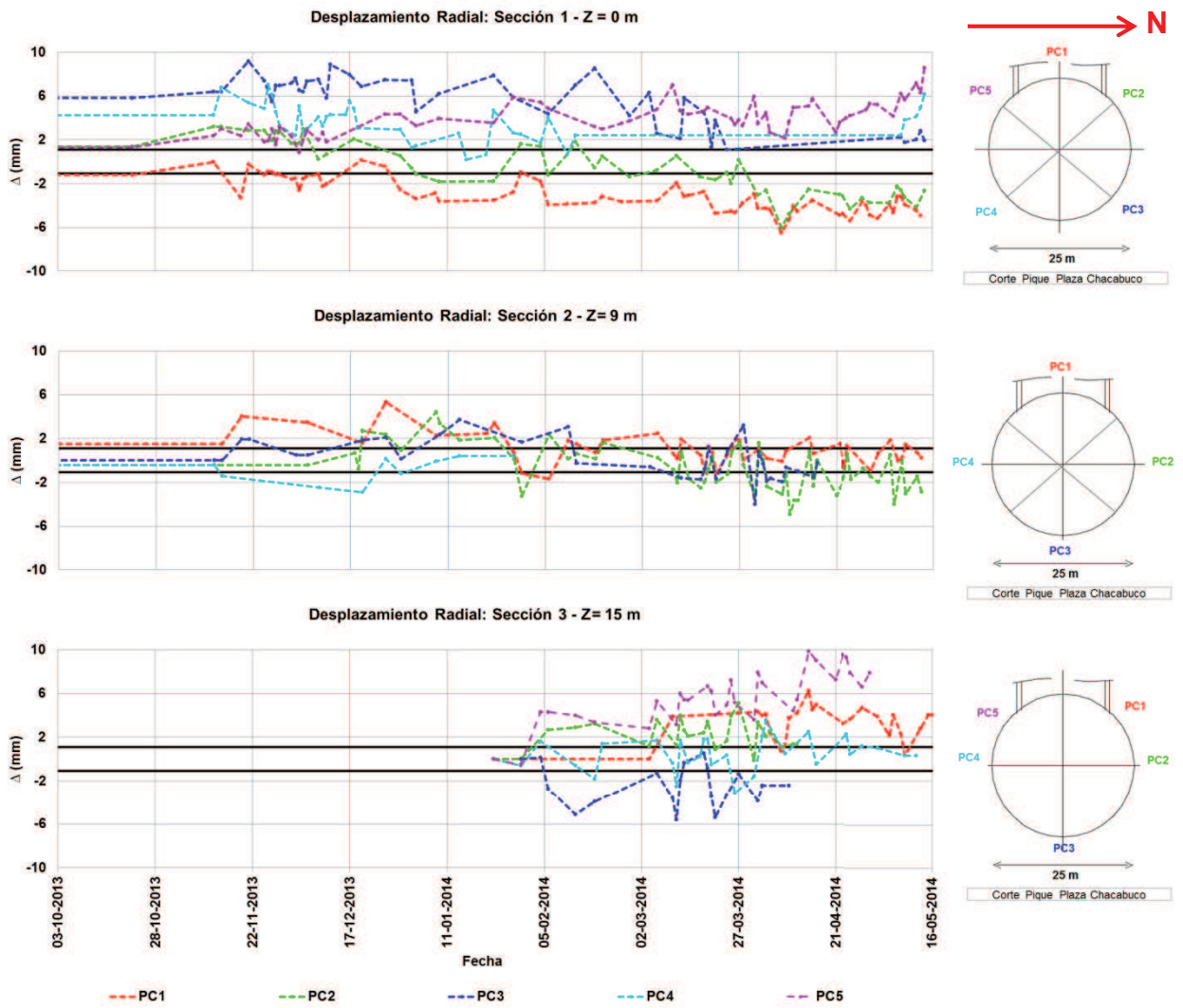
La sección 1 corresponde al monitoreo realizado en el brocal del pique. En el Periodo A los puntos PC2, PC3 y PC4 presentan un desplazamiento radial positivo (hacia el suelo), alcanzando un valor máximo de hasta  $6\text{mm} \pm 1$  mm. Los puntos PC1 y PC5 se encuentran por lo general dentro de la precisión de la medición. Durante el Periodo B, los desplazamientos se acentúan. PC1 y PC2 muestran desplazamientos negativos de hasta  $-6 \pm 1$  mm. PC3, PC4 y PC5 presentan desplazamientos positivos de hasta  $8,5 \pm 1$  mm.

La sección 2 corresponde al monitoreo realizado en el anillo superior de refuerzo a una profundidad de 9 m. En el Periodo A los desplazamientos radiales registrados son menores, siendo mayor el PC1 de  $1 \pm 1$  mm. Durante el Periodo B, se observan constantes variaciones en los desplazamientos en donde PC1 registra el máximo positivo de  $5,3 \pm 1$  mm y PC2 el máximo negativo de  $-4,9 \pm 1$  mm.

La sección 3 corresponde al monitoreo realizado en el anillo de refuerzo intermedio a una profundidad de 15 m. Sus mediciones se registran durante el Periodo B. Los puntos PC1, PC2, PC4 y PC5 manifiestan desplazamientos positivos con un valor máximo de  $9,8 \pm 1$  mm. PC3 muestra desplazamientos negativos alcanzando hasta  $-5,6 \pm 1$  mm.



**Figura 41:** Desplazamientos radiales medidos en Pique Plaza Chacabuco – Periodo A.



**Figura 42:** Desplazamientos radiales medidos en Pique Plaza Chacabuco – Periodo B.



## **6 Discusión y análisis de resultados.**

En esta sección se analizan los resultados presentados en el capítulo 5, con lo que se pretende comparar los datos medidos por los instrumentos con los valores esperados por el diseño del proyecto. En los casos que resultan posibles, se relacionan las lecturas medidas con los hitos constructivos ocurridos durante la excavación de ambos piques.

### **6.1 Diferencias de presiones del suelo sobre el sostenimiento.**

Tras la instalación de las celdas de presión, en algunos casos es necesario re-presurizar las celdas (aplicación de una presión interior mayor a la de fábrica) que tiene por objeto lograr que la celda entre en contacto con el suelo y el sostenimiento, en el caso que el contacto se haya perdido durante su instalación. Luego, la presión del suelo medida corresponde a la diferencia de presión entre la presión registrada por la celda en un momento determinado (lectura) y la presión de presurización inicial o referencial (o bien la presión de re-presurización, cuando corresponda). De esta manera, las presiones negativas registradas deben entenderse como presiones menores a la presión de referencia.

Es importante destacar que la lectura cero es realizada en una condición distinta a la condición operacional regular, debido al método constructivo utilizado en este proyecto. La condición inicial corresponde al momento en que es instalada la celda de presión sobre el suelo, el que carece de soporte y por lo tanto se encuentra temporalmente sujeto a posibles deformaciones de magnitudes desconocidas (por carecer de un sistema que las cuantifique). Esta lectura inicial se utiliza como referencia durante todo el registro de presiones, aun cuando la condición operación regular es distinta de la inicial. La condición operación regular corresponde a la etapa constructiva en que el manto o anillo se ha terminado de construir en su perímetro completo, es decir, se ha cerrado. (TUE, 2013. A).

Debido a esto, no es posible comparar de manera directa las presiones obtenidas con las presiones estimadas por diseño, pues no se encuentran referenciadas a una lectura

inicial en igualdad de condiciones. Sin embargo, es factible rescatar las máximas diferencias de presiones registradas por las celdas que fueron instaladas en último lugar dentro de un mismo nivel, de acuerdo a las fechas de instalación (ver Tabla 13 y Tabla 14). Se escogen estas celdas, pues el tiempo transcurrido entre la condición inicial y la condición de operación regular, que corresponde al cierre del anillo, es menor. Estos valores permiten obtener alguna referencia de las magnitudes de las presiones del suelo medidas

En el Pique El Cortijo, las celdas de presión instaladas en último lugar corresponden a las celdas CP7 y CP8, las que se encuentran en el costado oriente del pique sobre el ojo de la galería. A una profundidad de 9,8 m la celda de presión CP7 registra una variación de presión de 60 kPa, aproximadamente. A una profundidad de 18,7 m la celda de presión CP8 registra 28 kPa aproximadamente.

En el Pique Plaza Chacabuco, las celdas de presión instaladas en último lugar corresponden a las celdas CP1 y CP2, que se encuentran en el costado oriente del pique, diametralmente opuesto al eje vertical de la galería. A una profundidad de 5 m la celda de presión CP1 registra variación de presiones del orden de los 30 kPa. La celda CP2 no se considera en este análisis pues los valores registrados están fuera de rango.

Los valores indicados han de ser utilizados con cautela, pues corresponden a una diferencia de presión relativa a un nivel de deformación no conocido, el que depende del método constructivo utilizado, el tipo de suelo, las sobrecargas a nivel de superficie y las deformaciones ocurridas en el intervalo entre la condición inicial y final que no fueron medidas.

El método constructivo utilizado en los piques consiste en la excavación por bancos de 2 m de profundidad y en cuartos alternados en el área del pique en que el suelo de las paredes está descubierto hasta que se aplica el sostenimiento (ver sección 2.3). Éste sistema de excavación y protección afecta directamente a la distribución de las presiones medidas en función del tiempo. Por una parte, al realizarse una excavación, temporalmente autosoportada, se esperaría que se produzca algún nivel de deformación

del suelo o reacomodo de las partículas producto de cambios en las condiciones de confinamiento. Con esto, las tensiones horizontales del suelo debiesen disminuir con respecto al caso geoestático, acercándose a un estado activo de tensiones, lo que debiese manifestarse como una disminución de las presiones del suelo sobre el sostenimiento.

Por otra parte, y dado este método constructivo en particular, el sostenimiento actúa como elemento de contención recién cuando se completa su construcción a lo largo del perímetro completo del pique, en un determinado banco. De esta manera, las deformaciones al interior del pique son restringidas, provocando que el coeficiente de empuje del suelo deje de disminuir hacia el estado activo del suelo, y pasa a estar entre el coeficiente de empuje en reposo y el coeficiente de empuje activo (ver Figura 8). En consecuencia, se esperaría obtener un empuje de suelo mayor al empuje activo. Dado que no se consideró un sistema para determinar el grado o magnitud de deformación del suelo en su condición temporal auto-soportante, no es posible precisar su diferencia de magnitud esperable respecto a  $K_0$  o  $K_a$ .

Las sobrecargas que existen a nivel de superficie alrededor del pique, aumentan las tensiones verticales del suelo y por ende, las tensiones horizontales. La variación de estas sobrecargas en función del tiempo debiese traducirse en un aumento o disminución de las presiones del suelo registradas. Ejemplo de sobrecargas alrededor del pique, son zonas de acopio de material (por ejemplo del acero o el suelo excavado), grúas, camiones, etc. las cuales son variables en magnitud a través del tiempo, debiendo variaciones de las presiones del suelo principalmente en los niveles menos profundos del pique.

Dado que las sobrecargas no son equivalentes en toda la superficie próxima al pique, existen sectores con mayor carga que otros. Esto podría ser una de las razones por las cuales las magnitudes de las presiones registradas en un mismo nivel (igual profundidad), no sean iguales.

Respecto a los desplazamientos al interior del pique, AWWPA menciona que el método constructivo utilizado está diseñado para minimizar las deformaciones del suelo (Metro, 2013. O). Sin embargo, no existe un sistema de mediciones de deformaciones desde el comienzo de la excavación que confirmen este hecho, pues el monitoreo topográfico del manto comienza tardíamente, es decir, una vez instalado el sostenimiento. Por lo tanto, no es posible conocer el nivel de deformación que ha ocurrido al interior del pique para el periodo transcurrido entre la condición inicial y la de operación regular.

Como una manera de ejemplificar la variación de las presiones del suelo, en función del avance de la excavación, se han construido los gráficos que se presentan en la Figura 43 y Figura 44. Para la construcción de estos gráficos, se ha realizado una aproximación de las diferencias de presiones del suelo medidas, de acuerdo al avance de la excavación y actividades realizadas que han sido informadas mes a mes, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 1 y la Tabla 2.

La Figura 43 corresponde a las variaciones de presiones del suelo sobre el sostenimiento en función de la profundidad de avance de la excavación del Pique El Cortijo. Se observa que el sector de mayor sollicitación corresponde al costado poniente del pique, en el eje de la galería (sector donde están localizadas las celdas de presión CP7 y CP8).

En el Nivel 1, se observa que cuando el pique alcanza una profundidad de 24,4 m las presiones registradas aumentan en todas las celdas. De acuerdo a los hitos constructivos presentados en la Tabla 1, el avance de la excavación se detiene a esta profundidad, pues se instalan los tubos paraguas previos al inicio de la excavación de la galería. Este aumento de presiones, podría atribuirse a la presencia de cargas externas a nivel de superficie del pique, tales como maquinaria y materiales utilizados para preparar los trabajos de apertura de la galería. A una profundidad de 27,5 m de avance en la excavación, se da inicio a la excavación de la galería. Las presiones de la celda CP1 y CP4 disminuyen, mientras que la presión en la celda CP7 aumenta.

En el Nivel 2, las presiones registradas por las celdas CP2 y CP5 disminuyen a una profundidad de excavación de 24,4 m, mientras que la en la celda CP7 aumentan. Las variaciones de presiones registradas a este nivel, son menores que en los otros niveles.

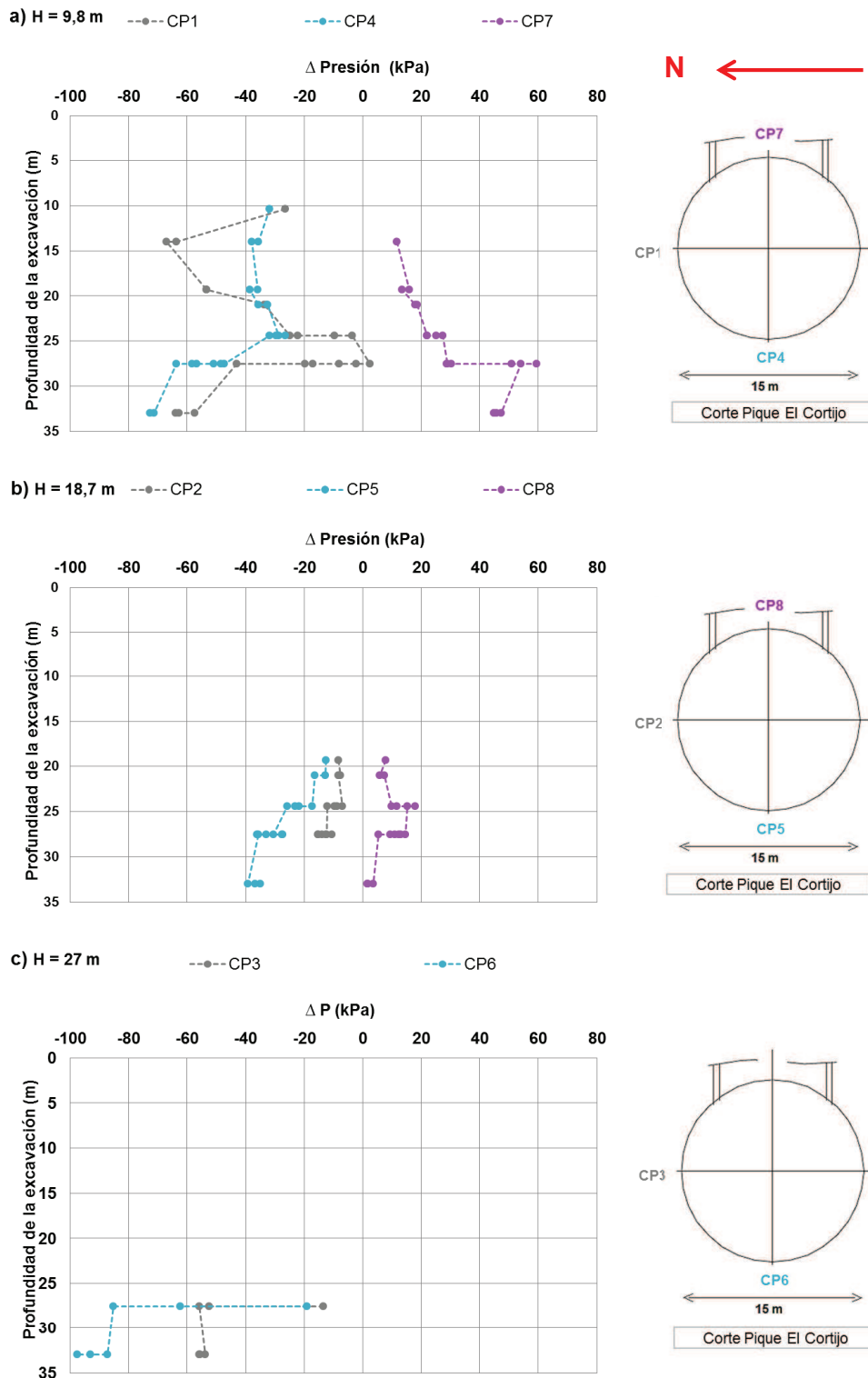
En el Nivel 3, las celdas CP3 y CP6 tienen un comportamiento similar, registrando diferencias de presiones negativas.

La Figura 44 corresponde a las variaciones de presiones del suelo sobre el sostenimiento en función de la profundidad de avance de la excavación del Pique Plaza Chacabuco. Se observa que el sector de mayor sollicitación corresponde al costado sur del pique (sector donde están localizadas las celdas de presión CP7, CP8, CP9 y CP10).

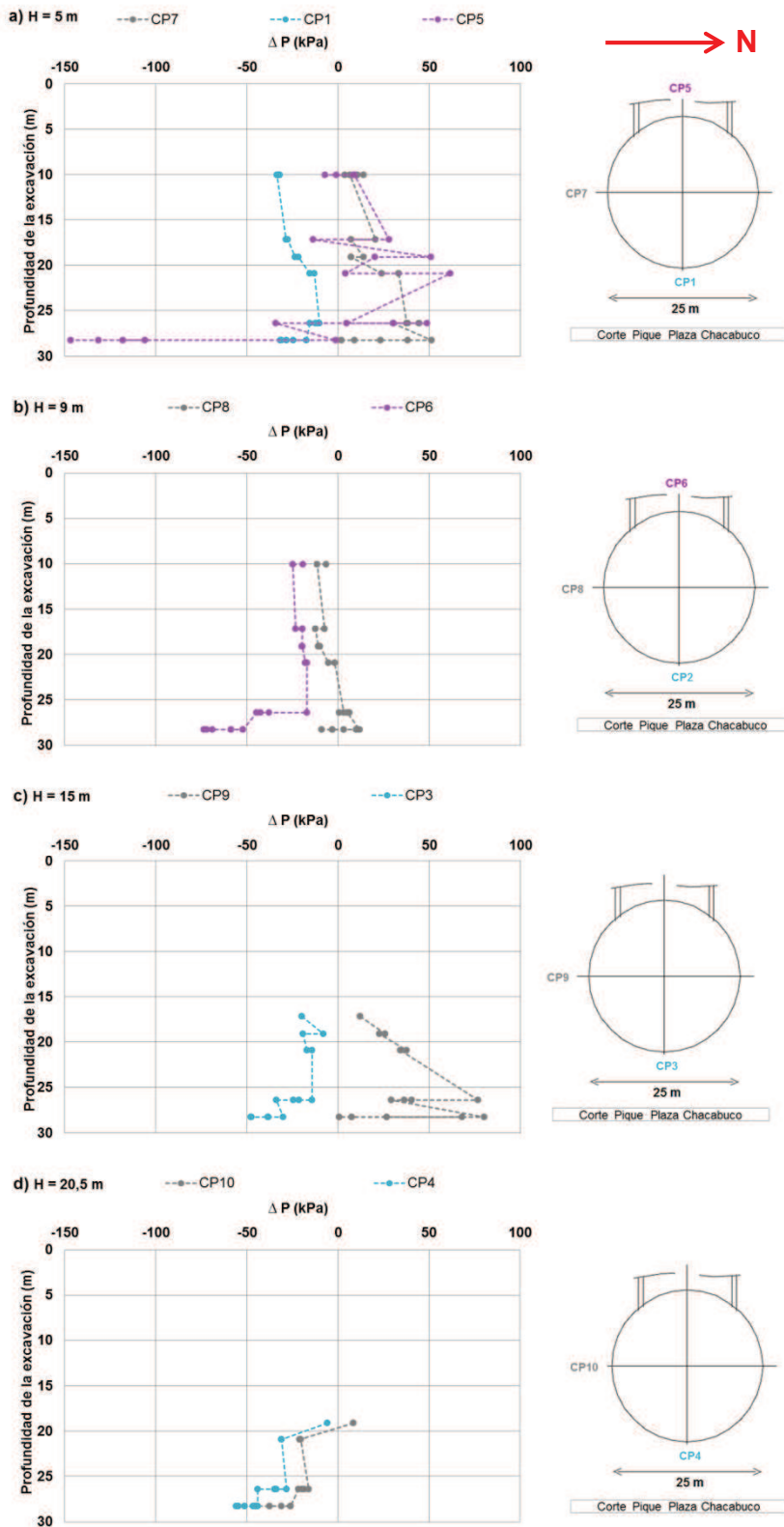
A diferencia del Pique El Cortijo, en el Pique Plaza Chacabuco se instalaron celdas de presión tanto en el manto del pique como en los anillos de refuerzo. De esta manera es posible apreciar que las diferencias de presiones sobre el manto (registradas por las celdas de presión CP5 y CP9) sufren mayores fluctuaciones de las presiones medidas con respecto a las celdas localizadas en los anillos de refuerzo, debido a que se encuentran en una zona estructuralmente menos rígida.

A excepción de las celdas de presión CP5 y CP9, todas las diferencias de presiones medidas están dentro del rango de 0 kPa y -70 kPa, presentando una curva parecida a medida que avanza la profundidad de la excavación.

Finalmente cabe mencionar que la mayor diferencia positiva registrada, es similar para ambos piques. Sin embargo, difieren en las diferencias de presiones negativas, alcanzando un mayor relajamiento de las presiones en niveles más profundos del Pique El Cortijo. Cabe destacar que el avance de la excavación fue distinto para cada pique. En el Pique Plaza Chacabuco primero se alcanzó la profundidad total del pique, para luego comenzar con la excavación de la galería. En cambio, para el Pique El Cortijo, la excavación del pique se detuvo para avanzar en la excavación de la galería.



**Figura 43:** Diferencias de presiones en función de la profundidad de avance de la excavación en a) Nivel 1 y b) Nivel 2 - Pique El Cortijo.



**Figura 44:** Diferencias de presiones en función de la profundidad de avance de la excavación en a) Nivel 1, b) Nivel 2, c) Nivel 3 y d) Nivel 4- Pique Plaza Chacabuco.

## 6.2 Tensiones en los elementos estructurales del pique.

Las deformaciones unitarias medidas en el hormigón permiten determinar el nivel de esfuerzo interno al que se ven sometidos los elementos estructurales analizados. A partir de estas mediciones, es posible obtener la distribución de deformaciones unitarias en una sección del anillo y de la columna de refuerzo.

Para determinar esta distribución se han considerado los siguientes supuestos: las secciones de los elementos estructurales permanecen planas, las deformaciones unitarias del hormigón varían de manera lineal con la distancia desde el eje neutro y que existe compatibilidad de las deformaciones, es decir, las deformaciones del acero medido en la sección son las mismas que se registran en el hormigón adyacente (Nilson, 1999).

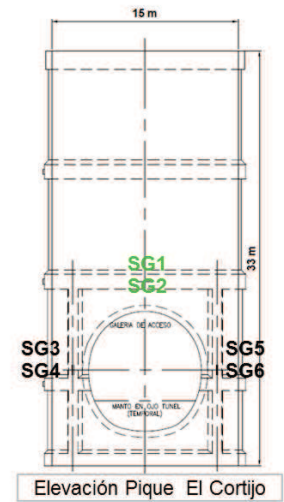
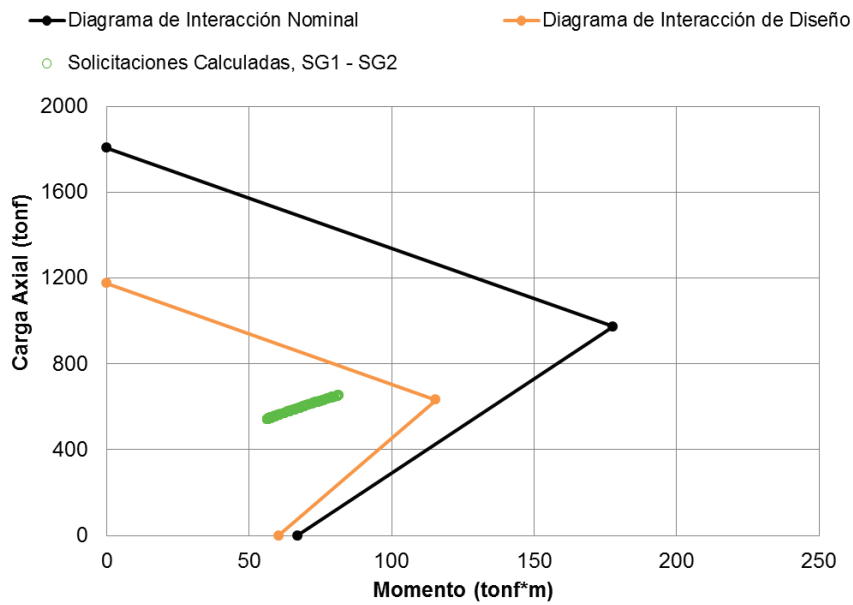
El esfuerzo interno se ha obtenido considerando el promedio de la deformación unitaria de la cara interna y externa de la sección, obteniéndose la deformación unitaria del centro del perfil de distribución de deformaciones. Luego, por semejanza de triángulos, se obtiene la distancia al eje neutro de la sección asumiendo que el hormigón ya ha llegado a la rotura.

Con la distancia al eje neutro, se realiza equilibrio de fuerzas y de momentos, obteniéndose los esfuerzos internos del elemento estructural (fuerza axial  $P$  y momento flector  $M$ ). Este par de esfuerzo, que varía a través del tiempo, se grafica dentro del diagrama de interacción simplificado y se observa si los niveles de demanda estructural se encuentran bajo la resistencia admisible de los elementos.

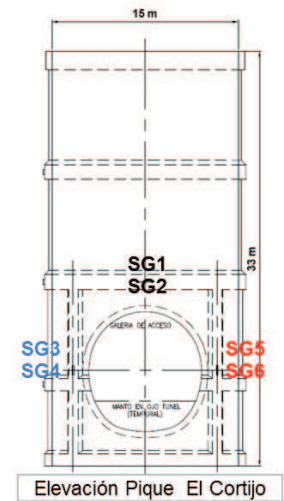
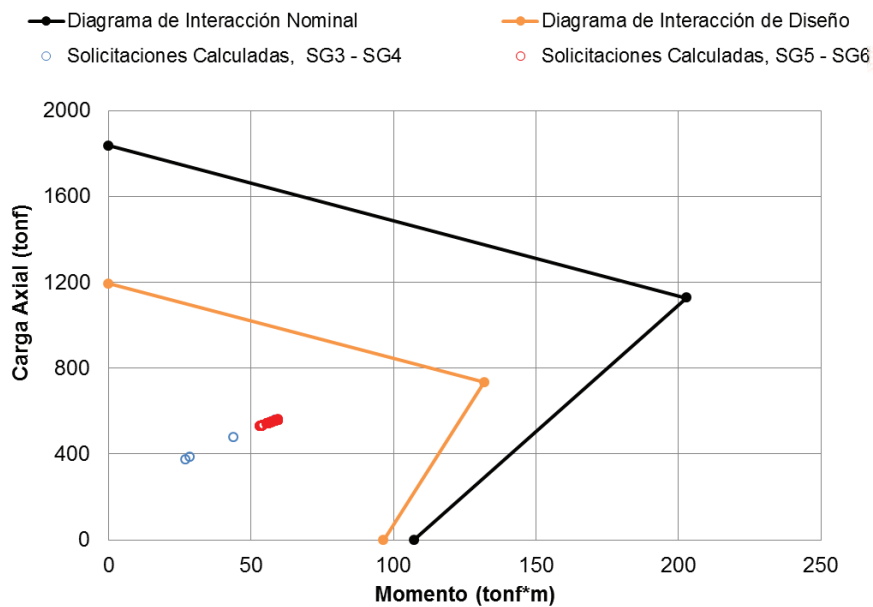
Las Figura 45 y Figura 46 muestran los niveles de demanda estructural en el Pique El Cortijo y el Pique Plaza Chacabuco. Los puntos verdes muestran la solicitación en las vigas. Los puntos azules y rojos presentan las solicitaciones en la columna izquierda y derecha, respectivamente. De estas se observa que el diseño realizado es adecuado pues se encuentran por debajo de la resistencia admisible de diseño de los elementos. De esta manera, los strain meters cumplen su objetivo de instalación, pues es posible obtener el nivel tensional de los elementos estructurales.



**a) Anillo Refuerzo Superior 2**

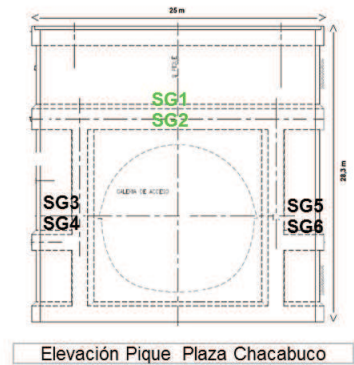
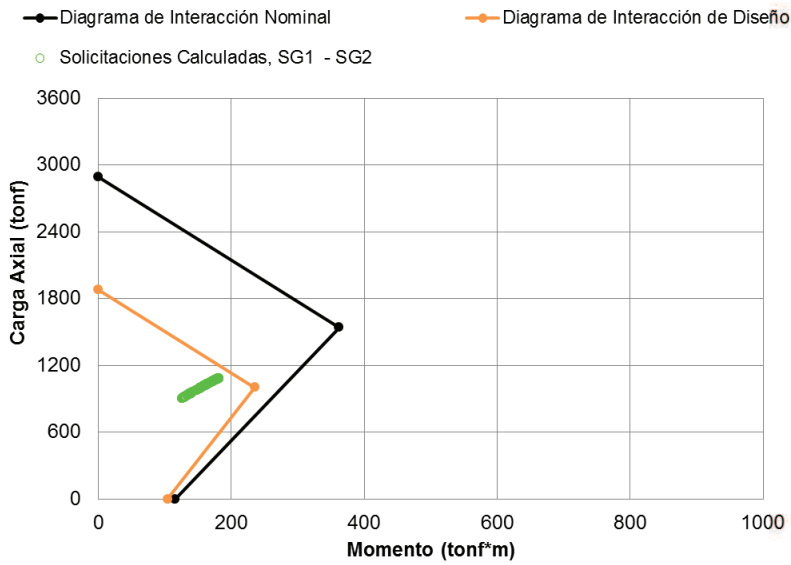


**b) Columna de Refuerzo**

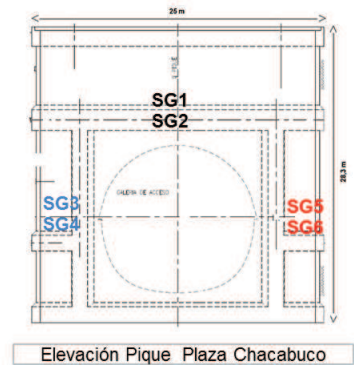
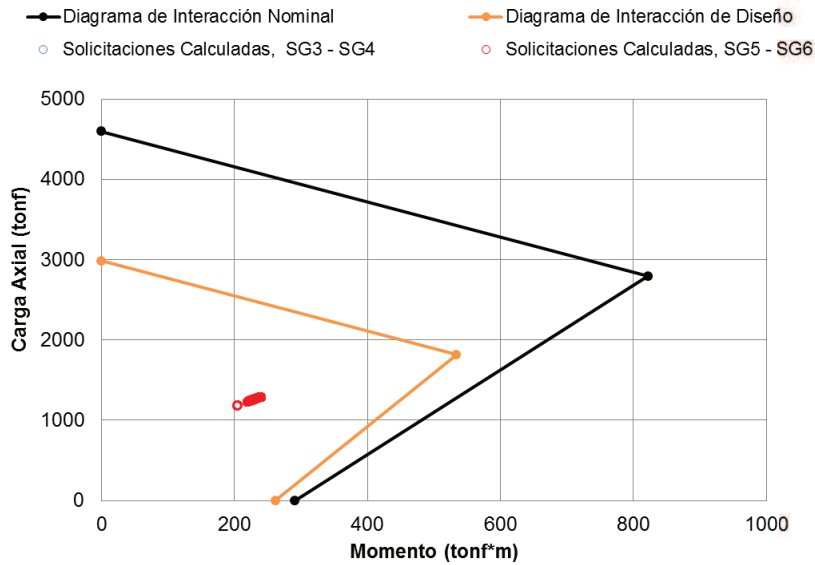


**Figura 45:** Solicitaciones medidas en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo - Pique El Cortijo.

**a) Anillo Refuerzo Superior 2**



**b) Columna de Refuerzo**



**Figura 46:** Solicitaciones medidas en a) Anillo de refuerzo y b) Columna de refuerzo - Pique Plaza Chacabuco.

### **6.3 Deformaciones del sostenimiento.**

Como ya se mencionó (sección 5.3), es posible distinguir dos periodos de mediciones. Los desplazamientos radiales leídos son mayores en el Periodo B que en el Periodo A. En otros casos, este valor supera el valor esperado y se acerca a los valores umbrales de alerta, como es en el caso del monitoreo topográfico de los brocales del pique. Además, existen variadas fluctuaciones en el desplazamiento radial registrado, dando a entender que el punto de control medido se desplazara tanto hacia el interior como hacia el exterior del pique, sin distinguir una tendencia clara de las deformaciones.

En base a la comunicación personal con la unidad de monitoreo (Geodata, 2014), no es posible esclarecer la razón de los valores y fluctuaciones de estas mediciones. Sin embargo, es factible entregar posibles causas que expliquen este comportamiento:

- Existe un periodo sin mediciones durante el cambio de la entidad a cargo del monitoreo topográfico. Las mediciones del Periodo B comienzan a partir del último desplazamiento radial registrado, obviando cualquier desplazamiento que pudo haber ocurrido dentro del periodo de un mes.
- La frecuencia de las mediciones es menor en el Periodo B que en el Periodo A. Al existir mediciones alejadas, las fluctuaciones son más notorias.
- Puede existir desprendimiento o mal posicionamiento de las miras en los puntos de control al interior del pique. Debido a lo variable del método constructivo, y los numerosos trabajos que se realizan al interior del pique, los prismas podrían verse modificados de su posición inicial, sin embargo, no existe registro constructivo que confirme o desestime esta afirmación.

Luego, en este trabajo de título no es posible afirmar con total certeza si los desplazamientos registrados corresponden a deformaciones reales del sostenimiento o alguna otra razón antes mencionada, pues en el pique no se advierten de daños estructurales asociados a deformaciones de tal magnitud.

## **7 Propuestas y recomendaciones.**

Este estudio, en el que se revisó el proyecto de instrumentación y monitoreo geotécnico – estructural implementado por Metro durante la construcción de piques circulares, muestra que no se alcanzaron todos los objetivos propuestos por Metro. En las siguientes secciones, se discute el uso de la instrumentación instalada en este proyecto. Además, se rescatan lecciones respecto al ejercicio de la auscultación y que debiesen ser consideradas como mínimo en todo proyecto de instrumentación y monitoreo.

### **7.1 Instrumentación instalada.**

Las celdas de presión presentan un correcto funcionamiento, pues efectivamente registran las diferencias de presiones y variaciones de estas debido a acontecimientos constructivos que ocurren durante la excavación de los piques. Sin embargo, como ya se ha mencionado en las secciones anteriores, las mediciones no se realizan en igualdad de condiciones iniciales y de operación regular, debido a la complejidad y la variación del sistema constructivo durante la ejecución de los piques.

Las celdas de presión, por lo general, son utilizadas para monitorear las presiones del suelo sobre muros de contención del tipo gravitacional, los cuales difieren al método de sostenimiento utilizado en la construcción de los piques de Metro. En el caso de los muros de contención gravitacionales, el muro se construye antes de la colocación del relleno de trasdós. Por lo tanto, en estos casos, la celda de presión registra desde una condición de tiempo anterior a la que es posible lograr en estos piques. Esto no es un problema de la celda ni del pique, sino más bien una desventaja de este método constructivo.

Un ejemplo de instrumentación y monitoreo de presiones del suelo fue realizado sobre un muro de contención gravitacional empotrado de hormigón armado, ejecutado por la Universidad de Minnesota el año 2002. El muro posee una altura de 7,9 m y la instrumentación consistió en celdas de presión, strain gauges e inclinómetros. Se utilizaron celdas de presión hidráulicas circulares de un diámetro de 230 mm. Los resultados indican un correcto funcionamiento de estos instrumentos, llegando a la

conclusión de que el diseño del muro de contención fue apropiado para la presión activa desarrollada (Bentler et al., 2005). En este caso, las mediciones son interpretadas con seguridad pues la lectura inicial se realiza en igualdad de condiciones que las lecturas realizadas con posterioridad, pues al ir aplicando el relleno, aumenta la carga sobre el muro y no está sometida a otra situación. No así ocurre en el caso de la celda localizada en el pique, ya que primero está adosada al suelo descubierto que experimenta deformaciones las que no son registradas y después se encuentra bajo el sostenimiento que no actúa como un elemento estructural hasta que el anillo es completado.

Por lo tanto, debido al método constructivo utilizado en los piques, estas celdas de presión no parecen ser la mejor opción debido a lo complejo de su instalación y de la secuencia constructiva. Esto habría sido advertido por Bureau de Projects e Consultoria Ltda (BUREAU) dentro de las recomendaciones entregadas por esta entidad a Metro. Sobre el desarrollo de empujes de suelo alrededor del pique, ellos indican: *“evitar que sean utilizadas celdas de presión en el contacto suelo/revestimiento (que siempre subestiman los valores de presión)... Por lo tanto, se propone que sean utilizadas técnicas de alivio de tensiones para determinación del esfuerzo actuante en el revestimiento de los piques”* (BUREAU, 2013).

En el caso de las lecturas obtenidas por las celdas de presión, un registro detallado de los hitos y eventos constructivos tanto en el interior como en torno al pique, contribuiría a determinar con mayor nivel de detalle cómo se desarrolla y varía el empuje del suelo sobre la estructura de contención. Por otra parte, al conocer con exactitud la fecha de cierre del anillo de refuerzo y el momento en que este anillo empieza a actuar como un elemento estructural en su conjunto, podría mejorar la referencia de la lectura de diferencias de presiones. Conocer lo que sucede en el entorno (a nivel de superficie), entrega información sobre las situaciones que producen un aumento o disminución en las solicitaciones.

Las lecturas obtenidas por los strain meters son claras. En la hoja de registro de los datos aparecen observaciones de las condiciones de terreno que se presentaron al momento de obtener las lecturas. Esta información contribuyó para validar o desestimar algunas

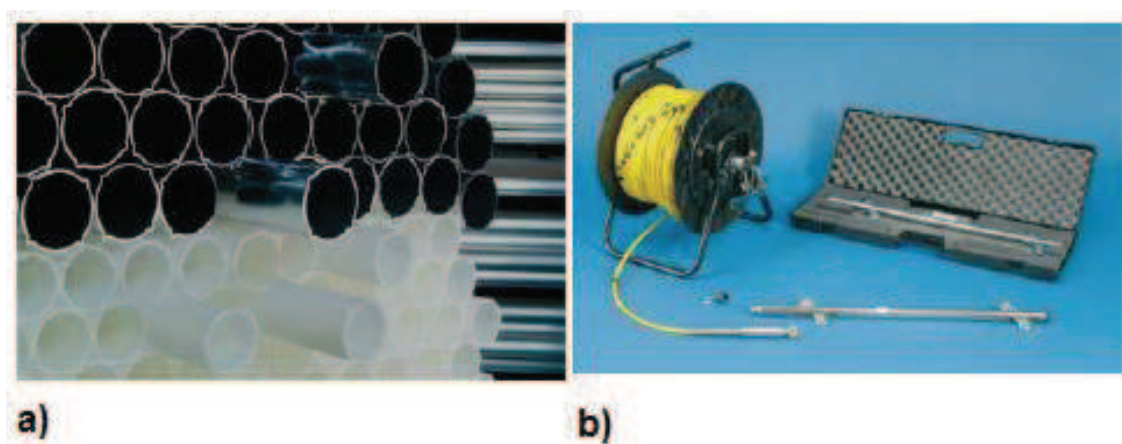
lecturas, sin embargo, se recomienda la instalación de dos o más pares de strain meters en cada zona estudiada, dado que es difícil realizar mayores interpretaciones si tan sólo se cuenta con un par de strain meters en los anillos de refuerzos y en las columnas. Efectivamente es factible analizar y procesar los resultados, pero no existe parámetro de comparación además, si se llegasen a cortar los cables de medición, o el instrumento sufre algún desperfecto, no se obtienen más lecturas del elemento estructural estudiado.

Para un futuro proyecto de instrumentación y monitoreo, se recomienda combinar el monitoreo de presiones del suelo con el monitoreo de deformaciones radiales al interior del pique. Es decir, incorporar prismas en el sostenimiento en la misma ubicación que las celdas de presión, de esta manera, se podría observar la deformación interior del pique frente a variaciones del empuje del suelo sobre el sostenimiento y estimar las zonas que están siendo más solicitadas. Todos los instrumentos utilizados en un proyecto de instrumentación y monitoreo, son parte de un sistema y debiesen complementarse en sus mediciones, por ejemplo, al existir duda de los resultados que se están obteniendo con un método en particular, se debiese comprobar con otro instrumento si lo que se está leyendo es concordante o no con lo que se está observando y si tiene sentido.

Además, se recomienda llevar un registro de eventos constructivos detallado. Este registro permitirá realizar una mejor interpretación de los resultados a través de un análisis del tipo causa – efecto, pues hay que tener en cuenta la gran cantidad de variables que intervienen en el sistema, tales como: la calidad de ejecución de la obra, la rapidez con que se lleva a cabo, solicitudes a nivel de superficie, y otras no abordadas.

Si el objetivo fuese, entre otros, entender el efecto del método constructivo sobre las deformaciones del suelo, sería interesante incorporar otro tipo de dispositivo al proyecto de instrumentación. Debido a que las celdas de presión se instalan cuando la excavación ya se ha realizado, se desconoce la deformación inicial del frente de excavación. Dado lo anterior, se recomienda incorporar un inclinómetro al proyecto de instrumentación y monitoreo, pues permitiría conocer la deformación total del suelo, es decir, desde que comienza la excavación utilizando este método constructivo en particular.

El inclinómetro es un instrumento utilizado para medir deformaciones del suelo. En este caso se propone para medir deformaciones horizontales cercanas a la excavación. La ventaja de este instrumento frente al monitoreo topográfico, es que se instala antes que comience la excavación, pudiendo así captar las deformaciones horizontales del suelo desde que se inicia la excavación a nivel de superficie. Estos instrumentos son definidos como mecanismos de monitoreo de deformación normal al eje de la tubería, por medio de una sonda que pasa a lo largo de ella (Dunnicliff, 1993). La sonda posee un transductor diseñado para medir la inclinación con respecto a la vertical y en otros planos como es en sentido horizontal o con algún ángulo de rotación. La Figura 47 muestra la tubería y la sonda inclinométrica.



**Figura 47:** a) Tubería para inclinómetro, b) Sonda inclinómetro (Sisgeo, 2005).

Este instrumento es ampliamente utilizado en otros tipos de obras, como por ejemplo en la construcción de muros pantallas. Los muros pantallas corresponden a muros de hormigón armado realizados en terreno, antes de iniciada la excavación. Por ejemplo en España, dentro del Plan de Ampliación y Construcción del Metro de Madrid (proyecto Metronorte) durante los años 2003 y 2007, se implementaron un total de 25 inclinómetros, de los cuales 16 de ellos pudieron aportar en conocer los desplazamientos del terreno frente a una excavación sostenida por muros pantallas.

Del proyecto Metronorte es posible destacar la cantidad de datos obtenidos debido al número de instrumentos utilizados, lo que permite desestimar las lecturas que no

concuerdan y seguir con la investigación. Además, se indican las razones principales de falla en la instalación y operación de algunos inclinómetros. En general algunas de las causas por las que no resultaron operativos fueron: problemas de instalación quedando en desuso desde el inicio, ubicación inadecuado según proyecto, problemas de estanqueidad ingresando agua y hormigón al interior, mala ejecución en el sistema de unión de las tuberías inclinométricas, pérdida de tapones de seguridad que permitieron la entrada de material inerte en su interior, entre otras (Sanhueza et al., 2009).

Por lo tanto, si se proyecta la instalación de un inclinómetro en este tipo de obras, se debe tener en consideración los principales problemas al que se podría enfrentar el instrumento durante la instalación y operación, mencionados en el párrafo anterior. Además, se debiese estudiar la distancia a la excavación adecuada de instalación del inclinómetro, una distancia tal que pueda experimentar deformaciones horizontales por el frente de excavación y que no se vea dañada por la misma. En el caso particular de los piques del Metro, esta distancia debiera ser de 1 m aproximadamente medido desde el borde de la excavación.

## **7.2 Recomendaciones generales.**

Un proyecto de instrumentación y monitoreo debe comenzar definiendo las variables que se buscan medir y qué situaciones o acciones controlan su comportamiento. Luego de esto, es posible escoger el o los instrumentos más adecuados para el tipo de proyecto. La elección correcta del instrumento no solo queda determinada por la capacidad de medir las variables que se buscan monitorear, además depende de las condiciones que afecten y/o dificultan el registro de las lecturas. Por ejemplo, si la manipulación del instrumento es delicada o necesita de condiciones ambientales óptimas que solo son posibles de reproducir en un ambiente controlado y no en grandes obras o si además, la instalación de éste es compleja, se debiese optar por otro tipo de instrumento.

Una vez seleccionado el instrumento a utilizar en el proyecto de instrumentación y monitoreo, se debe elaborar un protocolo de instrumentación. Un protocolo de instrumentación corresponde a la descripción detallada de la metodología que se



empleará durante la instalación, puesta en marcha, operación, mantenimiento y retiro de un instrumento o sistema de monitoreo. Este se constituye de información incluida en especificaciones técnicas, manuales técnicos de los fabricantes de equipos, proyecto de ingeniería y aportes individuales tanto del proyectista como del instalador. También debe explicar detalladamente cómo se logra llegar de un conjunto de productos a un sistema efectivo (TUE, 2013. B). Es bueno además, agregar esquemas o dibujos explicativos, en que la orientación de instalación del instrumento quede clara u otros esquemas que se consideren necesarios. Tanto quien se encarga de la instalación del instrumento, como quien realiza la lectura de los datos y el que las interpreta, deben conocer en detalle dicho protocolo, pues conocer el correcto funcionamiento del instrumento y todas las variables que pueden intervenir en terreno, permitirá tener un tratamiento más exitoso de los datos.

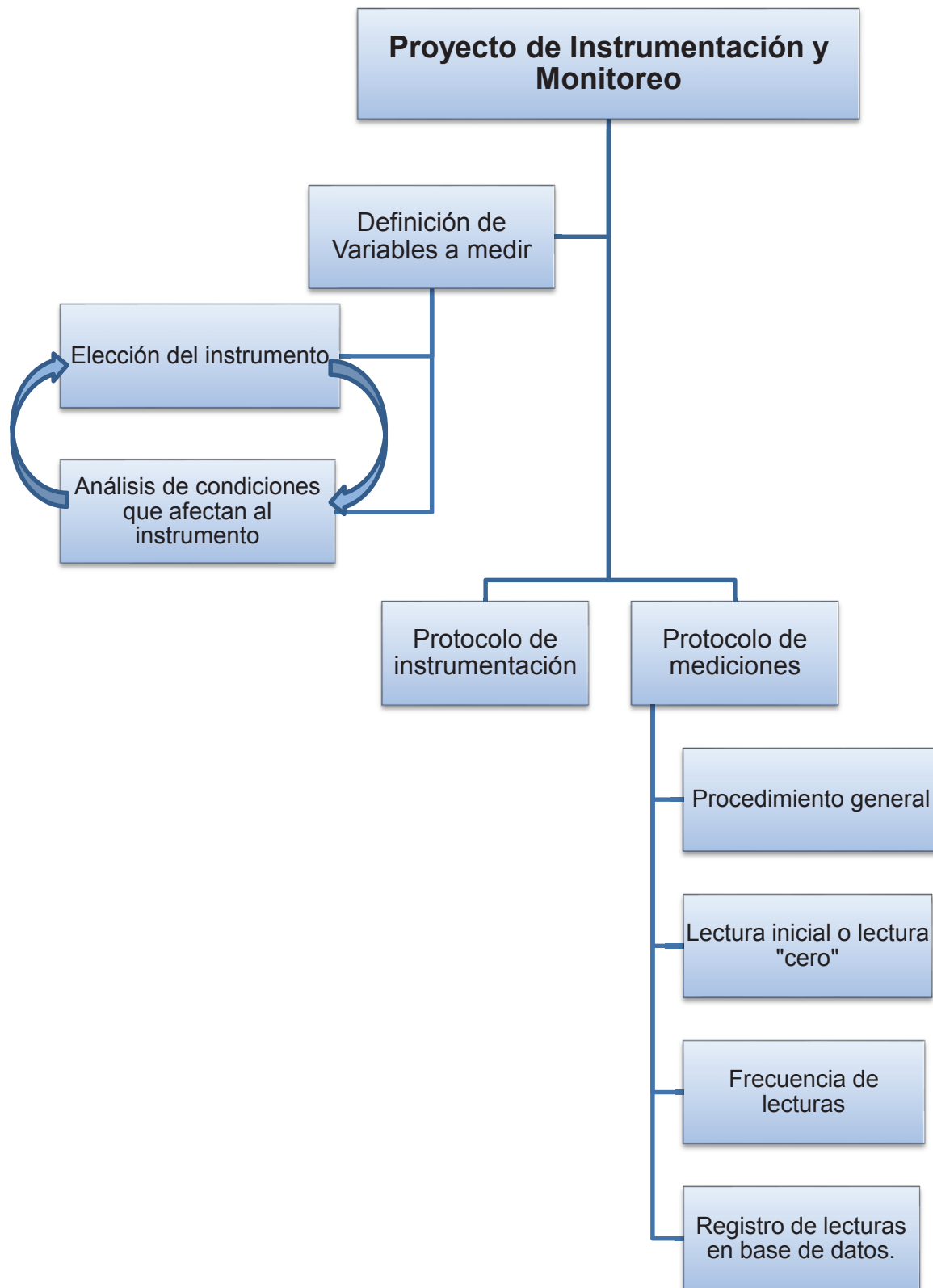
Parte esencial del proyecto de instrumentación, es el protocolo de mediciones. Se deben esclarecer procedimientos detallados de los pasos a seguir en la auscultación de datos. Para que las mediciones sean confiables, es necesario no solo el registro de la lectura, sino de las condiciones del entorno que pudiesen afectar de alguna manera el resultado obtenido y su interpretación. Por ejemplo, dejar registro de las observaciones generales y particulares durante la medición. Por observaciones generales nos referimos a las que ocurren en el entorno próximo, por ejemplo las cargas externas que existan en el momento de la medición, temperatura y/o condiciones ambientales, etc. Por observaciones particulares, se entiende a situaciones propias a la medición y su procedimiento, por ejemplo cortes de los cables de medición, cambio en el sistema de referencias, entre otras.

La lectura inicial o lectura “cero” corresponde a la lectura referencial del registro de mediciones. Es decir, todas las lecturas que se realicen después de ella, están referidas a la lectura inicial. Por lo tanto, hay que prever que las condiciones en las que se realiza la lectura inicial sean las mismas a las lecturas que le siguen. De esta forma, la referencia utilizada será correcta y los datos bien interpretados.

Las frecuencias de las lecturas son distintas para cada tipo de instrumento. Estas deben ser correctamente justificadas de acuerdo a la velocidad de evolución de los datos

medidos, del ritmo de avance de la obra o de la velocidad de la respuesta de los datos medidos en caso de registrar lecturas anómalas (Ortega, 2010). Por lo general, la mayor frecuencia en la medición se realiza cercana a la instalación o posterior a un evento constructivo relevante. Cabe señalar que el registro de datos debe ser ordenado, claro y de fácil acceso para quien realice el análisis e interpretación de ellos para evitar dobles lecturas de los mismos. La Figura 48 presenta un esquema de los aspectos mínimos a considerar en cualquier proyecto de instrumentación.

Dentro de las principales lecciones aprendidas no solo en este proyecto de instrumentación y monitoreo, sino en otros proyectos de instrumentación de excavaciones en entorno urbano, destaca el hecho del riesgo que existe de que la auscultación termine convirtiéndose en una colección de datos sin una utilidad directa y sin sacar el máximo provecho de estos. Para que ello no ocurra se debe optimizar el proceso, desde la planificación inicial hasta el seguimiento y tratamiento de los datos. Además, no es bueno separar la interpretación de datos de quien lleva un control de la forma de cómo se llevan a cabo las mediciones, pues así es posible entender el proceso en su totalidad (Ortega, 2010).



**Figura 48:** Aspectos mínimos a considerar en un proyecto de instrumentación y monitoreo.

## 8 Conclusiones.

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- Las celdas de presión se ven afectadas durante su operación por dos condiciones. La primera es la condición inicial, que corresponde al momento en que es instalada la celda de presión sobre el suelo y aun no se ha construido el sostenimiento, y la segunda es la condición de operación regular, que es cuando el manto o anillo se ha terminado de construir en todo su perímetro. Ambas condiciones se ven reflejadas en las mediciones mediante una disminución y un aumento de las presiones del suelo, respectivamente.
- La presión del suelo depende de las deformaciones y cambios tensionales que ocurren en él, las que están asociadas al método constructivo utilizado en este proyecto. Cuando se instala la celda de presión, este instrumento está adosado al suelo en una condición distinta a la de operación regular. Por lo tanto, no es posible comparar la presión del suelo registrada por el monitoreo con la presión del suelo utilizada en el diseño.
- Las mediciones de deformaciones unitarias obtenidas por los strain meters cumplen con el objetivo propuesto, pues se logra obtener las tensiones del marco que refuerza el ojo de la galería. De esta manera se obtiene que el diseño de la armadura es adecuado. Sin embargo, se recomienda incorporar más de un par de strain meters en cada zona estudiada, pues así se obtienen parámetros de comparación y mayor confianza en la obtención de datos si es que alguno de estos instrumentos sufre algún desperfecto.
- El monitoreo topográfico de convergencia no es concluyente, pues en algunos puntos de control se excede el valor de deformación calculada y experimenta variadas fluctuaciones, sin que en el pique se hayan advertido daños estructurales asociados a deformaciones de tal magnitud.

- Los instrumentos utilizados en un proyecto de instrumentación y monitoreo son parte de un sistema, por lo tanto, entre ellos deben complementarse y ser concordantes entre sí. Por ejemplo, es primordial que junto a la celda de presión exista un prisma en el sostenimiento, de esta manera se puede corroborar si las lecturas obtenidas por las celdas son consistentes. Se recomienda combinar las mediciones obtenidas por monitoreo topográfico de convergencia con el registro de las diferencias de presiones.
- Debido al método constructivo, se conocen las deformaciones y las presiones del suelo en una condición tardía. Es importante saber la condición de deformación anterior a la instalación de las celdas de presión, para así comprobar si efectivamente el suelo está o no deformándose anterior al cierre del anillo y en qué magnitud. Por lo tanto, se recomienda utilizar algún instrumento que permita conocer las deformaciones horizontales que sufre el suelo durante la excavación, por ejemplo, un inclinómetro dispuesto en forma vertical.

Para futuras investigaciones se recomienda que el estudio de los datos obtenidos por instrumentación sea acompañado paralelamente con un modelo numérico, de esta manera, la modelación de los piques podría mejorar dadas las condiciones que existen en terreno y la velocidad real de la excavación.

Por otra parte, se recomienda estudiar en más detalle las diversas teorías que explican el desarrollo de presiones del suelo en piques circulares y su relación con el método constructivo.

## 9 Bibliografía.

BUREAU. (2013). Carta dirigida a Luis Valenzuela P. Asunto: Informe preliminar empujes de suelo en piques de Línea 3 – Metro Santiago.

Dunnicliff, J. (1993). “Geotechnical instrumentation for monitoring field performance”. Ed. John Wiley & Sons, New York, 77, 250 – 268.

Geodata. (2014). Comunicación personal.

Geosinergia. (2013). “Procedimiento instalación de celdas de presión”. Geosystems. (2009). “Leica TM30”. Sensor de auscultación Cada medio segundo cuenta.

Gesche, R. (2013). Archivo fotográfico de piques El Cortijo y Plaza Chacabuco.

Bentler, J., Labuz, J., Schultz, A. (2005). “Earth pressure behind a retaining wall”. Final report 20015-14. University of Minnesota.

Lambe, W. T., Whitman, R. V. (2013). “Mecánica de suelos”. Limusa. Estructuras de retención y taludes, 177 – 209.

Metro. (2012). A. “Bases Administrativas”. Líneas 3 y 6 – Metro de Santiago. Monitoreo topográfico para la excavación de piques y túneles Líneas 3 y 6.

Metro. (2012). B. “Informe revisión antecedentes y validación mecánica de suelos Línea 3 Metro de Santiago. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-00-INF-000-SU-001.

Metro. (2012). C. “Criterios de diseño obras subterráneas”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-CRD-000-TU-001-R00.

Metro. (2012). D. “Especificaciones técnicas particulares. Monitoreo geotécnico Tramo 1”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-ETP-000-TU-103-R00.

Metro. (2012). E. “Plano pique de construcción Pique El Cortijo, sistema de monitoreo – pique”. Plano n° L3-ID-02-PLA-057-TU-804-R03.

Metro. (2013). A. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Abril 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-101-R0B.

Metro. (2013). B. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Mayo 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-102-R0B.

Metro. (2013). C. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Junio 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-103-R0B.

Metro. (2013). D. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Julio 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-104-R0B.

Metro. (2013). E. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Agosto 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-105-R0B.

Metro. (2013). F. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Septiembre 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-106-R0B.

Metro. (2013). G. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Octubre 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-107-R0B.

Metro. (2013). H. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Noviembre 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-108-R0B.

Metro. (2013). I. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Diciembre 2013”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-109-R0B.

Metro. (2013). J. “Análisis de piques Línea 3. Comparación con diseños de Líneas anteriores”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-TU-001.

Metro. (2013). K. “Procedimiento instalación strain meters”. Protocolo de instrumentación emitido por AMEC n° W40101-0000-300-INF-025.

Metro. (2013). L. “Memoria de cálculo estructural pique de construcción, diámetro 15 m–altura 33 m, suelo fino”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-MCA-057-TU-001-R0B.

Metro. (2013). M. “Memoria de cálculo estructural pique estación, diámetro 25 m–altura 28 m, grava”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-MCA-051-TU-013-R0B.

Metro. (2013). N. “Procedimiento instalación strain meters”. Informe emitido por AMEC n° W40101-0000-300-INF-025-R0B.

Metro. (2013). O. “Análisis de piques Línea 3”. Comparación con diseño de Líneas anteriores. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-TU-001-R0B.

Metro. (2013). P. “Pique de construcción El Cortijo – Umbrales de celdas de presión”. Sistema de monitoreo. Esquema emitido por AWPA n° L3-ID-02-ESQ-057-TU-003-R00.

Metro. (2013). Q. “Estación Plaza Chacabuco – Umbrales de celdas de presión”. Sistema de monitoreo. Esquema emitido por AWPA n° L3-ID-02-ESQ-206-TU-004-R00.

Metro. (2013). R. “Valores umbrales para monitoreo piques estación y construcción, galerías de acceso a túneles interestación”. Tramo 4. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-TU-814-R0B.



Metro. (2014). A. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Enero 2014”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-110-R0B.

Metro. (2014). B. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Febrero 2014”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-111-R0B.

Metro. (2014). C. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Marzo 2014”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-112-R0B.

Metro. (2014). D. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Abril 2014”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-113-R0B.

Metro. (2014). E. “Actividades realizadas por la supervisión de obras durante el mes de Mayo 2014”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-000-CP-114-R0B.

Metro. (2014). F. “Historia de Metro”. < <http://www.metroantiago.cl/corporativo/historia> > (Mayo, 2014).

Metro. (2014). G. “Informe de monitoreo topográfico y geotécnico de pique de construcción El Cortijo”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-057-TU-801-R0B.

Metro. (2014). H. “Informe de monitoreo topográfico y geotécnico de pique estación Plaza Chacabuco”. Informe emitido por AWPA n° L3-ID-02-INF-206-TU-801-R0B.

Nilson, A. H. (1999). “Diseño de estructuras de concreto”. Columnas cortas. McGraw-Hill Interamericana, S.A., 250 - 255.

Ortega, J. (2010). “Instrumentación de excavaciones en entorno urbano”. Jornada técnica: Instrumentación de túneles y excavaciones. Barcelona, 21 de octubre de 2010.

Petrus. (2011). “Piques y galerías Tramo1. Línea 3 Metro de Santiago”.

Sanhueza, C., Oteo, C. "Control de movimientos reales producidos en pantallas continuas en Madrid (1ª parte)". Revista de la Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile. Vol. 8, núm. 2, 2009, pp. 72-84)

Sisgeo. (2005). "Perfil de la compañía y catálogo de productos".

Terzaghi, K., Peck, B. R., Mesri, G. (1996). "Soil mechanics in engineering practice". Willey – Interscience Publication. Earth pressure and stability of slopes, 349 – 359.

TUE. (2013). A. "Interpretación de los resultados de celdas de presión". Proyecto de instrumentación y monitoreo de piques El Cortijo y Plaza Chacabuco, Diciembre de 2013. Informe emitido para Metro

TUE. (2013). B. "Revisión de antecedentes". Proyecto de instrumentación y monitoreo de piques El Cortijo y Plaza Chacabuco. Línea 3 Metro de Santiago, Agosto de 2013. Informe emitido para Metro.

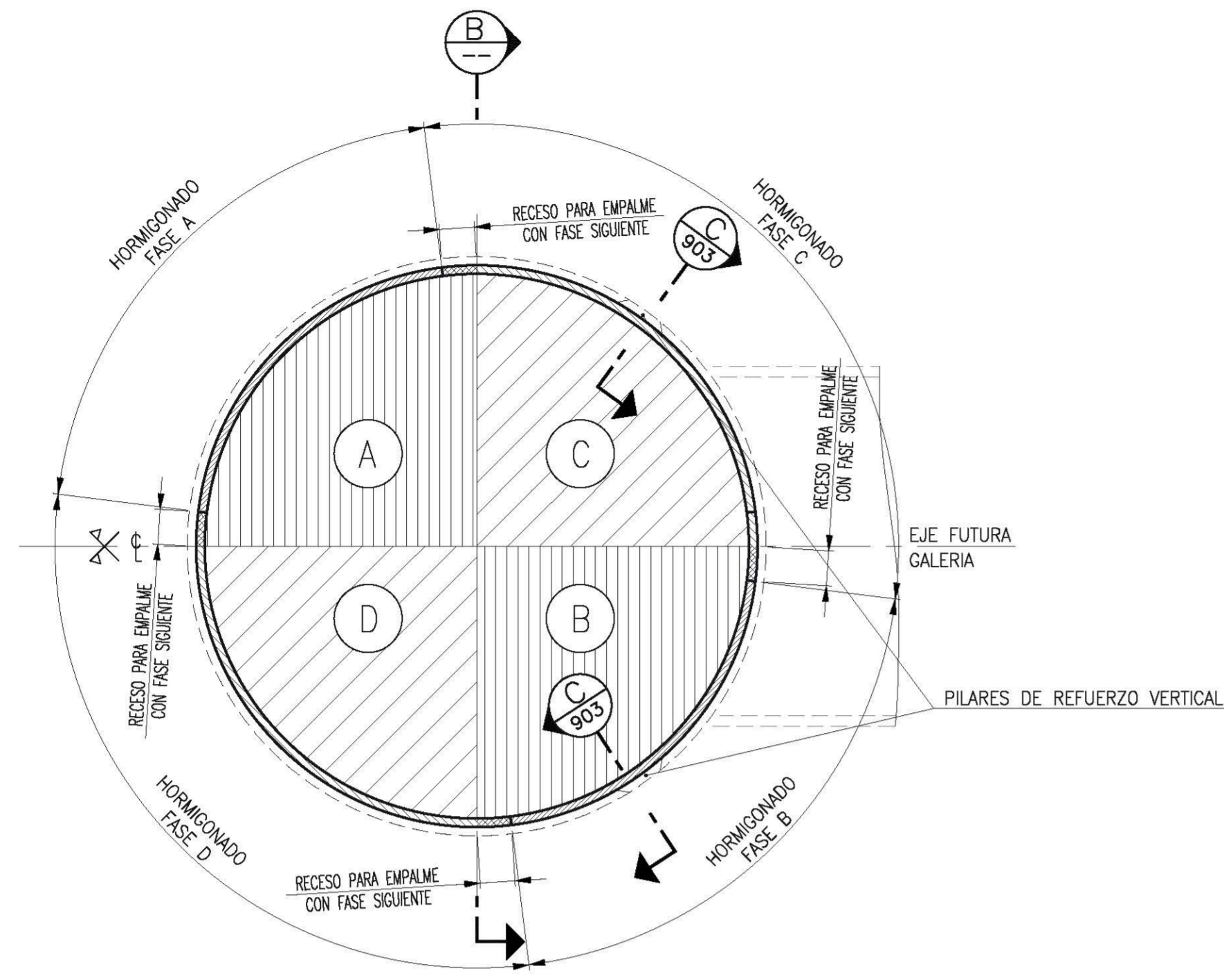
TUE. (2014). "Informe final. Proyecto de instrumentación y monitoreo de piques El Cortijo y Plaza Chacabuco, Línea 3 del Metro de Santiago", Abril de 2014. Informe emitido para Metro.

## **Anexos**

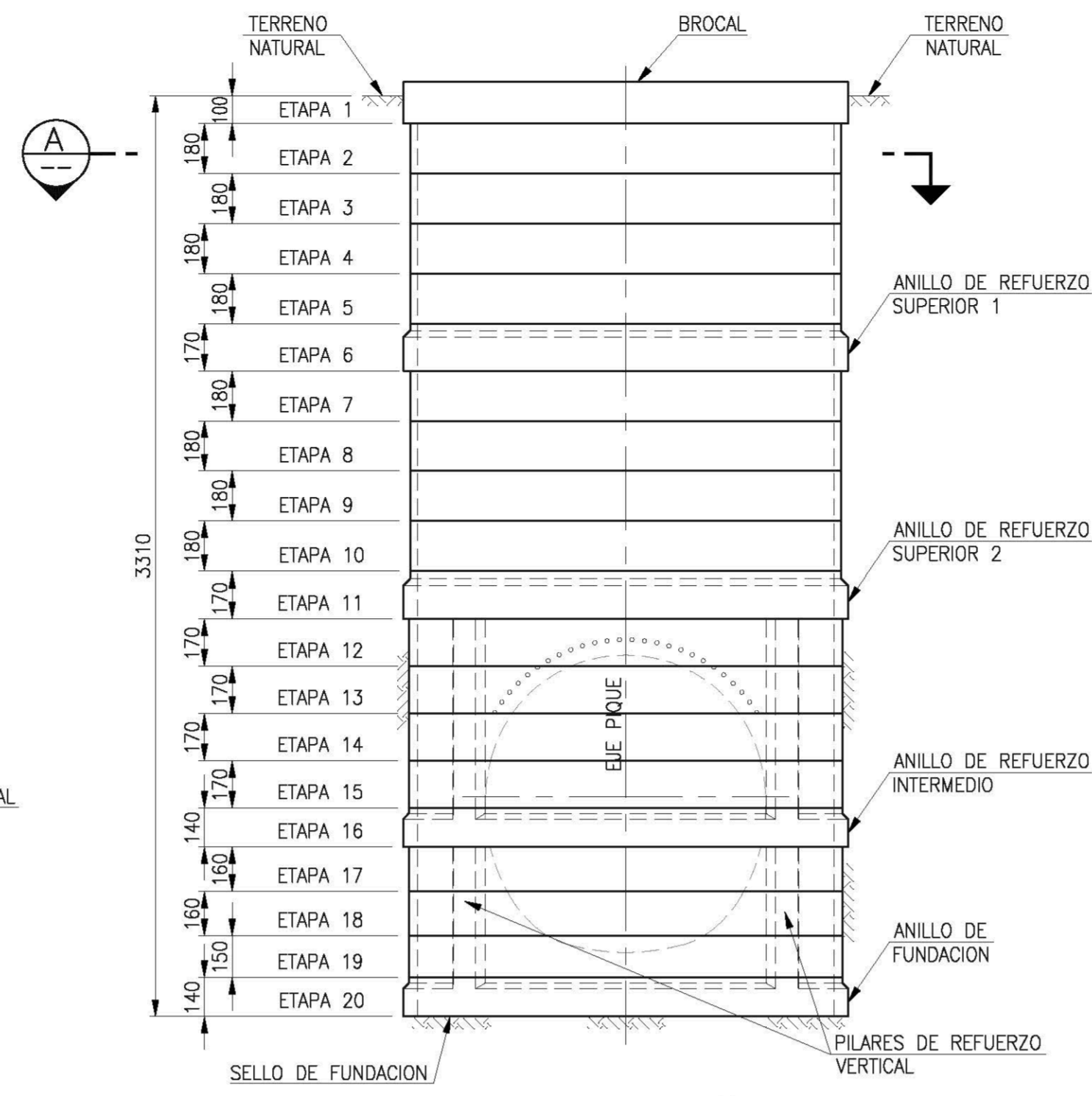
### **Anexo A: Planos de construcción.**

1. Plano de secuencia constructiva Pique El Cortijo
2. Plano de secuencia constructiva Pique Plaza Chacabuco

**SECUENCIA DE EXCAVACION Y SOSTENIMIENTO PIQUE**



(ETAPAS 2 A 17)  
**SECCION A**  
ESC. 1 : 150



**SECCION B**  
ESC. 1 : 200  
NOTA: EN ETAPA 12 Y 13 SE DEBEN INSTALAR LOS PARAGUAS

**SECUENCIA DE CONSTRUCCION PIQUE**

ETAPA 1 (BROCAL):

- EXCAVAR PRIMER BANCO DE 100 cm DE PROFUNDIDAD EN FORMA MASIVA EN TODO EL AREA DEL PIQUE, COLOCAR ARMADURAS Y HORMIGONAR CONTRA TERRENO, EN CASO QUE EL SUELO SEA INESTABLE O DE MALA CALIDAD, EXCAVAR EN TALUD Y HORMIGONAR CONTRA MOLDAJE. SE DEBERAN DEJAR BARRAS #16 @ 15cm ENTERRADAS EN FORMA MANUAL A 70 cm EN EL SUELO PARA SU POSTERIOR EMPALME CON LA MALLA ELECTROSOLDADA DE LA SIGUIENTE ETAPA.

ETAPA 2:

- SE PODRA INICIAR ESTA ETAPA SOLO CUANDO EL HORMIGON DEL BROCAL ALCANCE LA RESISTENCIA DE PROYECTO.

-LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARAN EN CUARTOS Y ALTERNADAMENTE, COMO SE MUESTRA EN LA SECCION A. SE EXCAVARA Y REVESTIRA DE ACUERDO A LA SIGUIENTE SECUENCIA:

- 1' EXCAVAR, BAJO EL NIVEL DE ETAPA 1, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D) SEGUN SE INDICA EN SECCION A Y EN PROFUNDIDAD SEGUN SECCION B.
- 2' COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e = 5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
- 3' COLOCAR 1' MALLA ELECTROSOLDADA Y SUPLES EVENTUALES EMPALMADA CON ARMADURA ENTERRADA EN ETAPA 1 Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO ESPESOR 10 cm, DEJANDO SIN HORMIGONAR Y DESCUBIERTA 1' MALLA EN 45 cm APROXIMADAMENTE, PARA FUTURO EMPALME VERTICAL Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL.
- 4' COLOCAR 2' MALLA ELECTROSOLDADA Y SUPLES EVENTUALES EMPALMADA CON ARMADURA ENTERRADA EN ETAPA 1 Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR 25 cm DE ESPESOR TOTAL, DEJANDO SIN CUBRIR PARTE DE LA MALLA PARA PERMITIR SU FUTURO EMPALME VERTICAL Y LATERAL (45 cm PARA MALLA, 90 cm PARA SUPLES Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL).

ETAPAS 3-4 y 5 (MANTO):

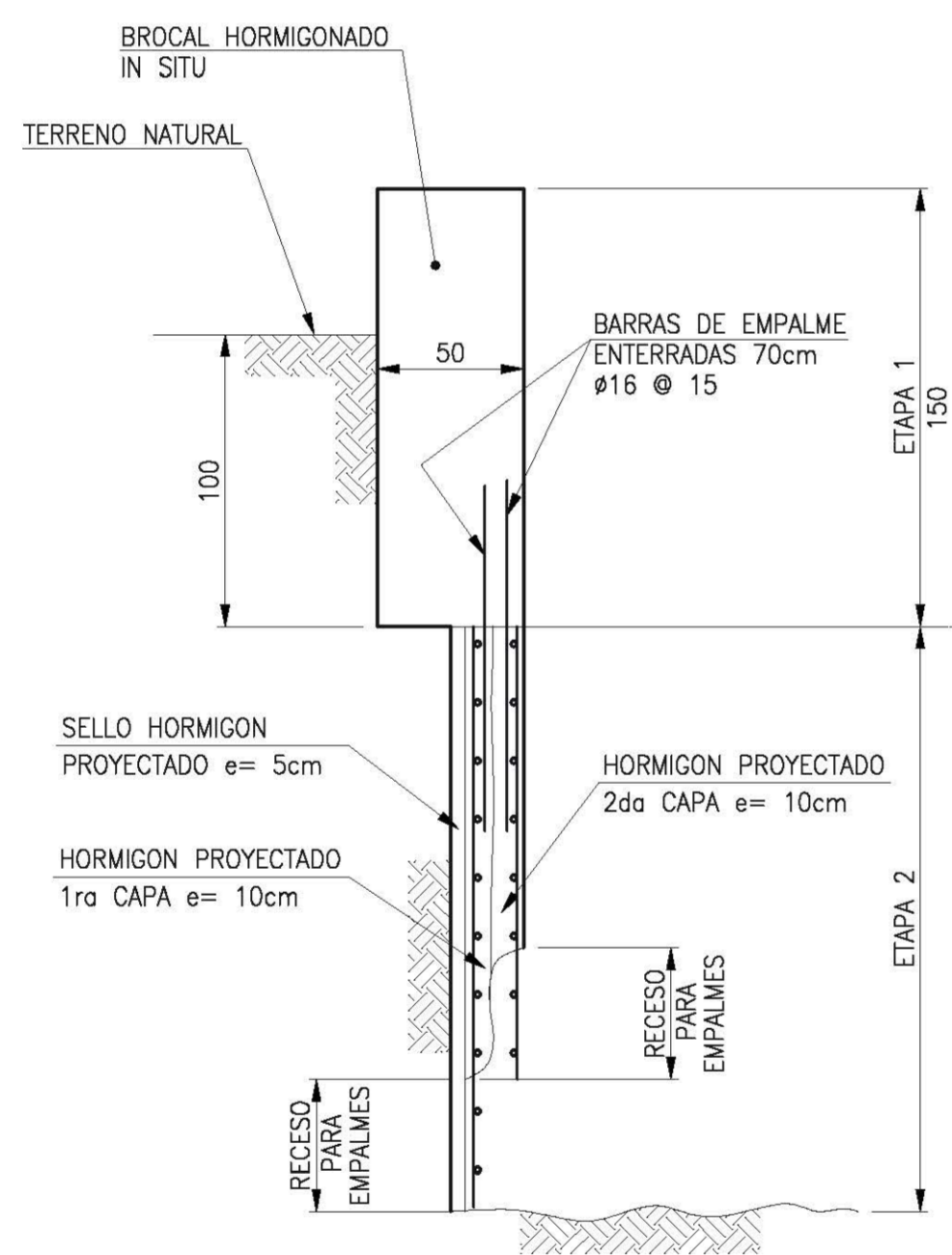
- LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARA POR CUARTOS Y ALTERNADAMENTE, COMO SE MUESTRA EN SECCION A. SE EXCAVARA Y REVESTIRA DE ACUERDO A LA SIGUIENTE SECUENCIA:

- 1' EXCAVAR BAJO EL NIVEL DE ETAPA 2, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D), SEGUN SE INDICA EN SECCION A Y EN PROFUNDIDAD SEGUN INDICA LA SECCION B.
- 2' COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e=5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
- 3' COLOCAR 1a MALLA ELECTROSOLDADA Y SUPLES EVENTUALES EMPALMADA CON MALLA SUPERIOR Y LATERAL, COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR ESPESOR DE 10 cm DEJANDO SIN HORMIGONAR Y DESCUBIERTA 1a MALLA EN 45 cm APROXIMADAMENTE PARA FUTURO EMPALME VERTICAL Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL.
- 4' COLOCAR 2a MALLA ELECTROSOLDADA Y SUPLES EVENTUALES EMPALMADA CON MALLA SUPERIOR Y LATERAL Y COLOCAR 10 cm HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR 25 cm DE ESPESOR DEJANDO SIN CUBRIR PARTE DE LA MALLA PARA PERMITIR SU FUTURO EMPALME VERTICAL.

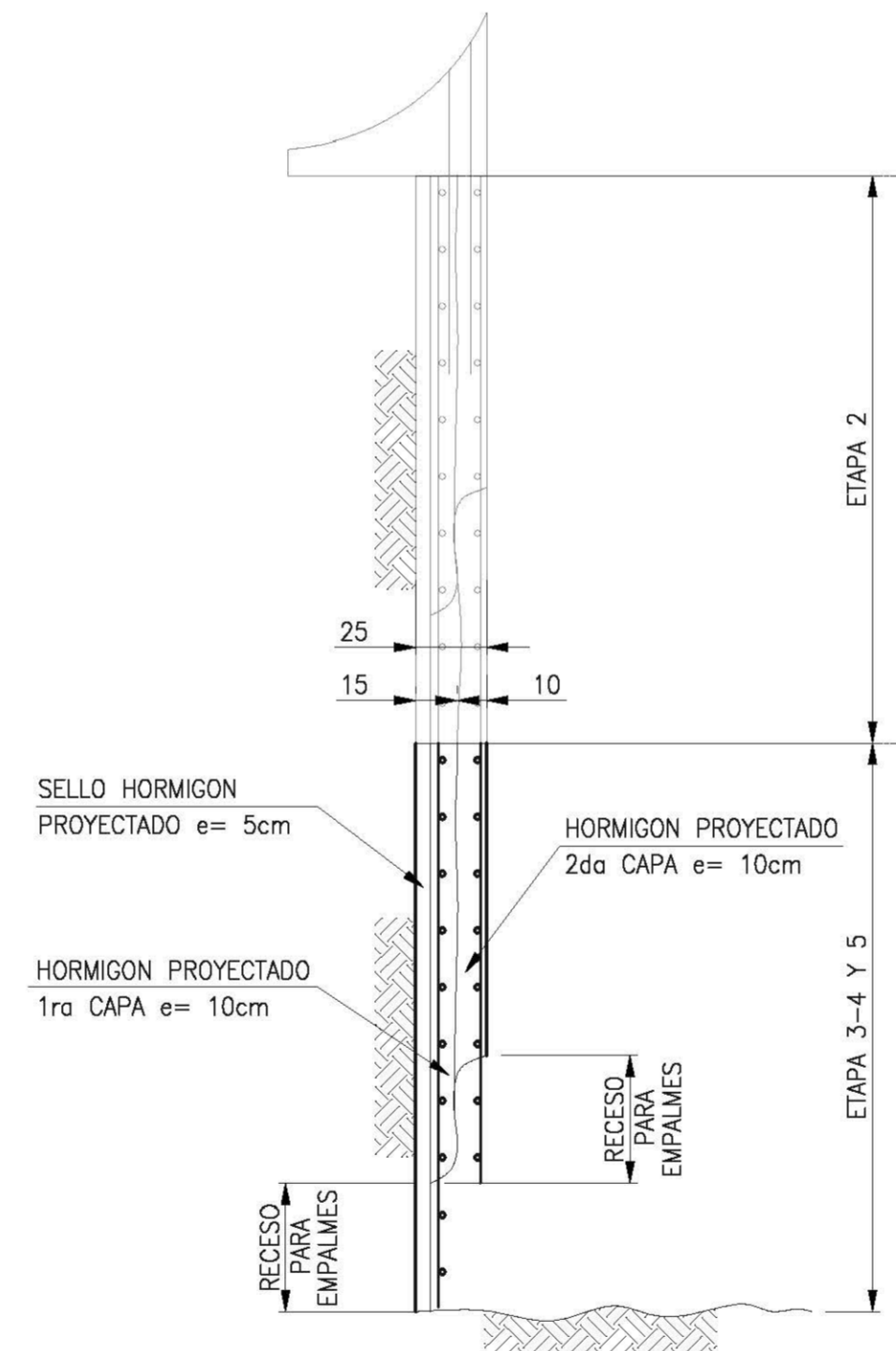
ETAPA 6: (ANILLO SUPERIOR 1)

- LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARAN POR CUARTOS Y ALTERNADAMENTE COMO SE MUESTRA EN SECCION A. DE ACUERDO A LA SIGUIENTE SECUENCIA:

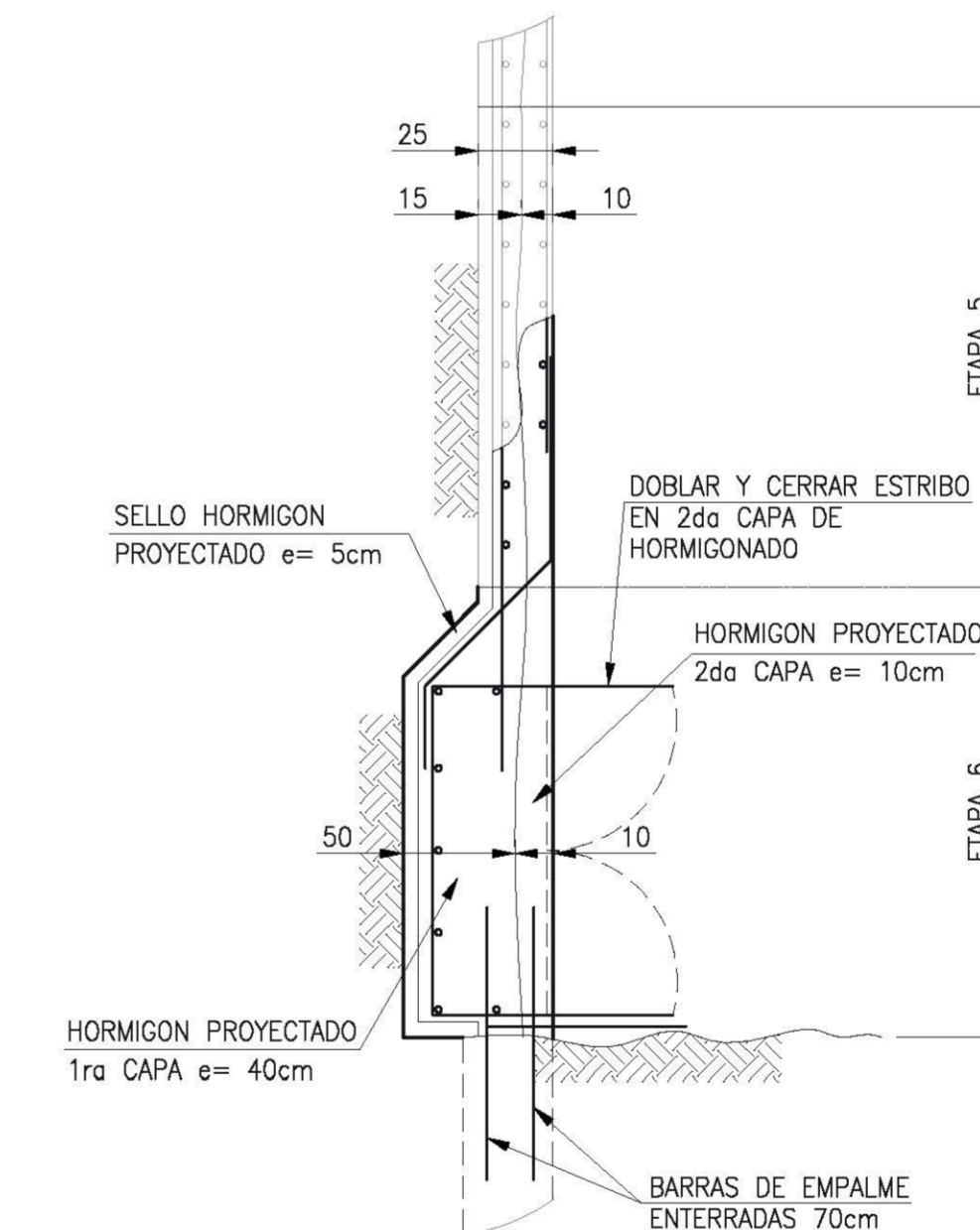
- 1' EXCAVAR BAJO EL NIVEL DE ETAPA 5, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D) SEGUN SE INDICA EN SECCION A Y EN PROFUNDIDAD SEGUN SE INDICA EN SECCION B.
- 2' COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e=5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
- 3' COLOCAR BARRAS # 16 @ 15 ENTERRADAS EN FORMA MANUAL A 70 cm EN EL SUELO, PARA EMPALME VERTICAL.
- 4' COLOCAR ARMADURAS EXTERIORES Y LOS ESTRIBOS ABIERTOS. COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO CON CAPAS DE MAXIMO 15 cm DE ESPESOR HASTA COMPLETAR 50 cm. COLOCAR HORMIGON PROYECTADO CON PITON EN ANGULO Y DISTANCIA APROPIADA, DE MANERA DE MINIMIZAR LA SOMBRA DETRAS DE LAS ARMADURAS.
- 5' COLOCAR ARMADURAS INTERIORES Y BARRAS DOBLADAS PARA LA SIGUIENTE ETAPA, LOS ESTRIBOS SE DOBLAN Y CIERRAN PARA COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR EL 2' CICLO DE ESPESOR 10 cm. COLOCAR HORMIGON PROYECTADO CON PITON EN ANGULO Y DISTANCIA APROPIADA, DE MANERA DE MINIMIZAR LA SOMBRA DETRAS DE LAS ARMADURAS.



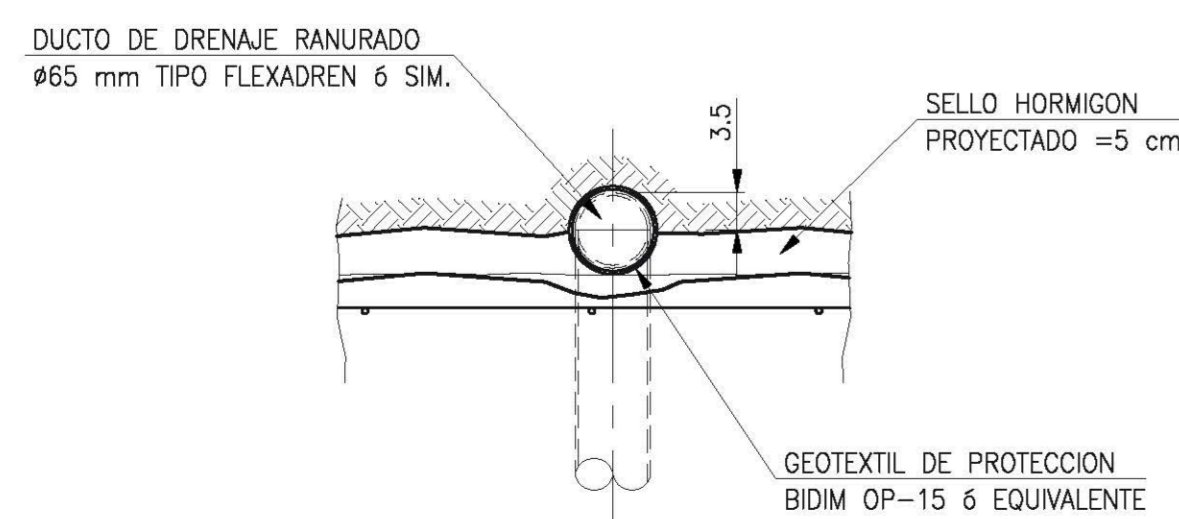
**ETAPAS DE EXCAVACION 1 Y 2**  
ESC. 1 : 25



**ETAPAS DE EXCAVACION 3-4 Y 5**  
ESC. 1 : 25



(ANILLO DE REFUERZO SUPERIOR 1)  
**ETAPA DE EXCAVACION 6**  
ESC. 1 : 25



**DETALLE DE DRENAJE EVENTUAL**  
ESC. 1 : 5

NOTAS:  
1.- DIMENSIONES EN CENTIMETROS (S.I.C.)  
2.- VER NOTAS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-057-TU-901.

REV	FECHA	DESCRIPCION	PROY.	CALC.	REV.	ASE.	APR. J.E.	APR. D.P.
1	11.01.13	MODIFICACION GENERAL POR CAMBIO DE TRAZADO	P.P.G.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
0	05.10.12	EMITIDO PARA CONSTRUCCION	L.P.B.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
B	07.09.12	EMITIDO PARA APROBACION	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
A	31.08.12	EMITIDO PARA COORDINACION INTERNA	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.

REFERENCIAS	TITULO
PLANO N°	

ESPECIALIDAD	CONTRATO N°	PLANO N°
TUNELES	I12150	L3-ID-02-PLA-057-TU-902-R01

CONTENIDO	ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REEMPLAZA A	REV
INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES PIQUE DE CONSTRUCCION EL CORTIJO PIQUE - PLANO 1 DE 2 SECUENCIA CONSTRUCTIVA		31.08.2012		L3-ID-01-PLA-057-TU-901-R0C	

**METRO S.A.**  
GERENCIA DE PROYECTO LINEA 3

NOMBRE PROYECTISTA	FECHA	FIRMA
SUBGERENCIA OCCC Y ARQUITECTURA	FECHA	FIRMA
GERENCIA DE ING. Y TECNOLOGIA	FECHA	FIRMA
NOMBRE CONTRATISTA	FECHA	FIRMA

**METRO S.A.**  
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3  
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS

**ARCADIS** **ARA** **WorleyParsons**

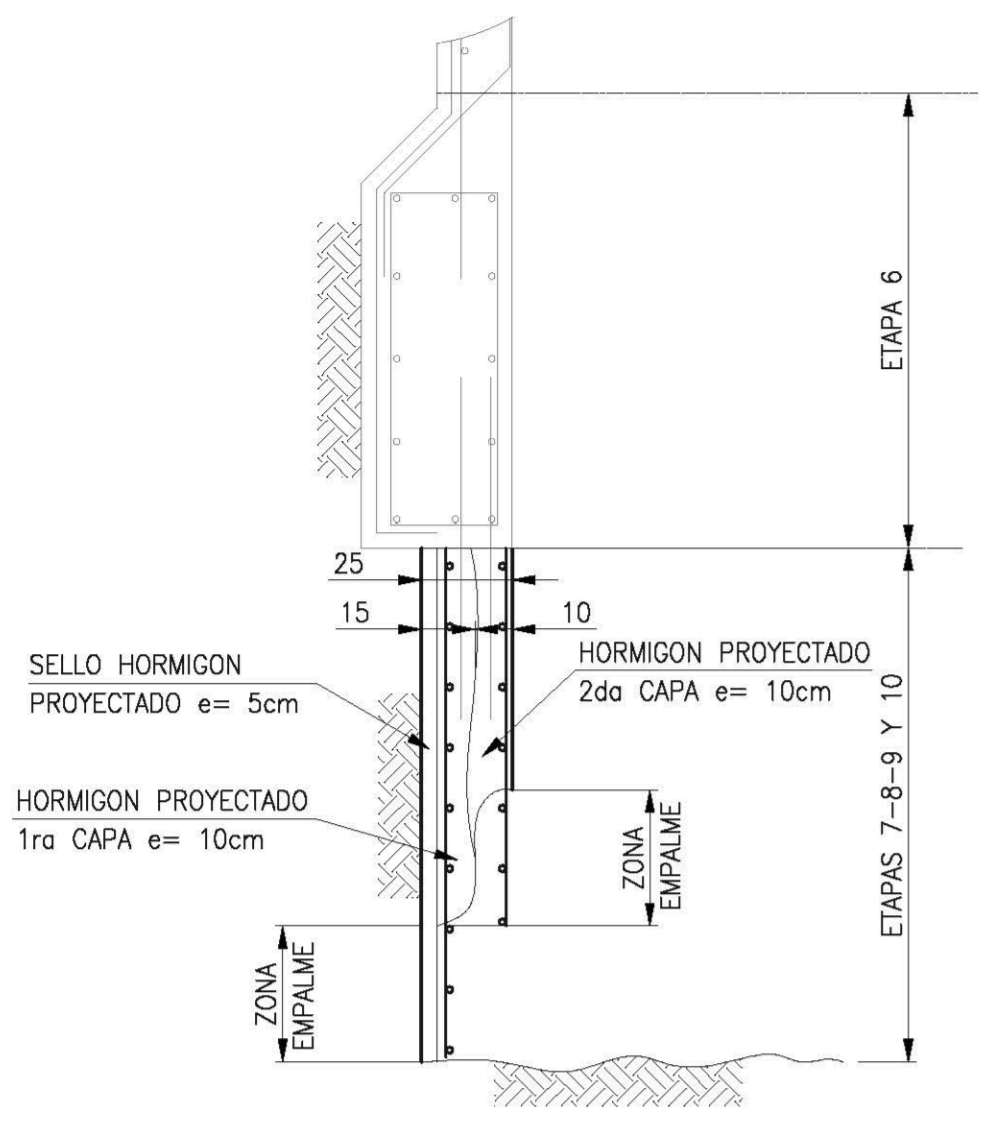
Especialidad	Contrato N°	Plano N°
TUNELES	I12150	L3-ID-02-PLA-057-TU-902-R01

INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES  
**PIQUE DE CONSTRUCCION EL CORTIJO**  
PIQUE - PLANO 1 DE 2  
SECUENCIA CONSTRUCTIVA

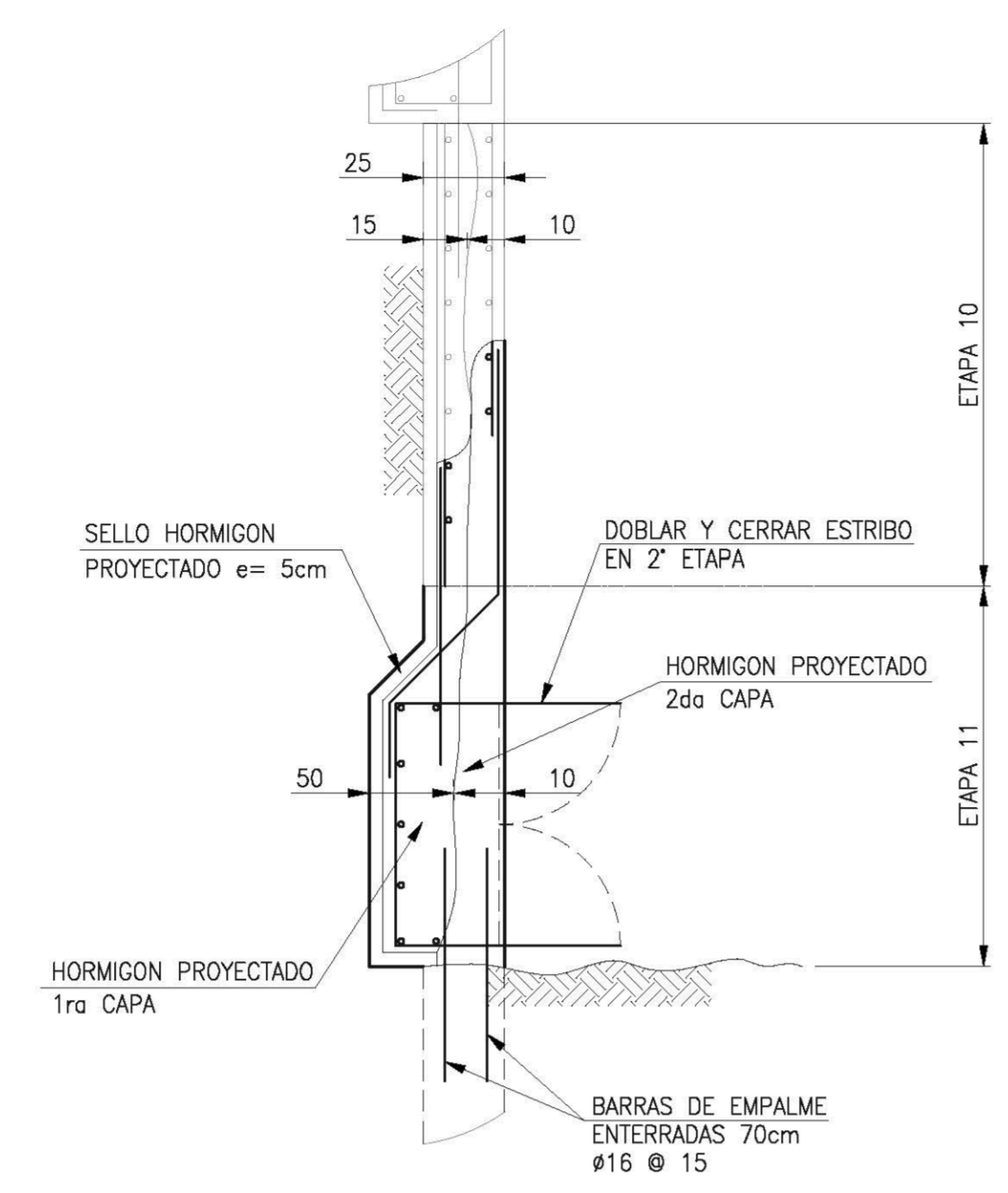
ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REEMPLAZA A	REV
	31.08.2012		L3-ID-01-PLA-057-TU-901-R0C	

**SECUENCIA DE CONSTRUCCION PIQUE**

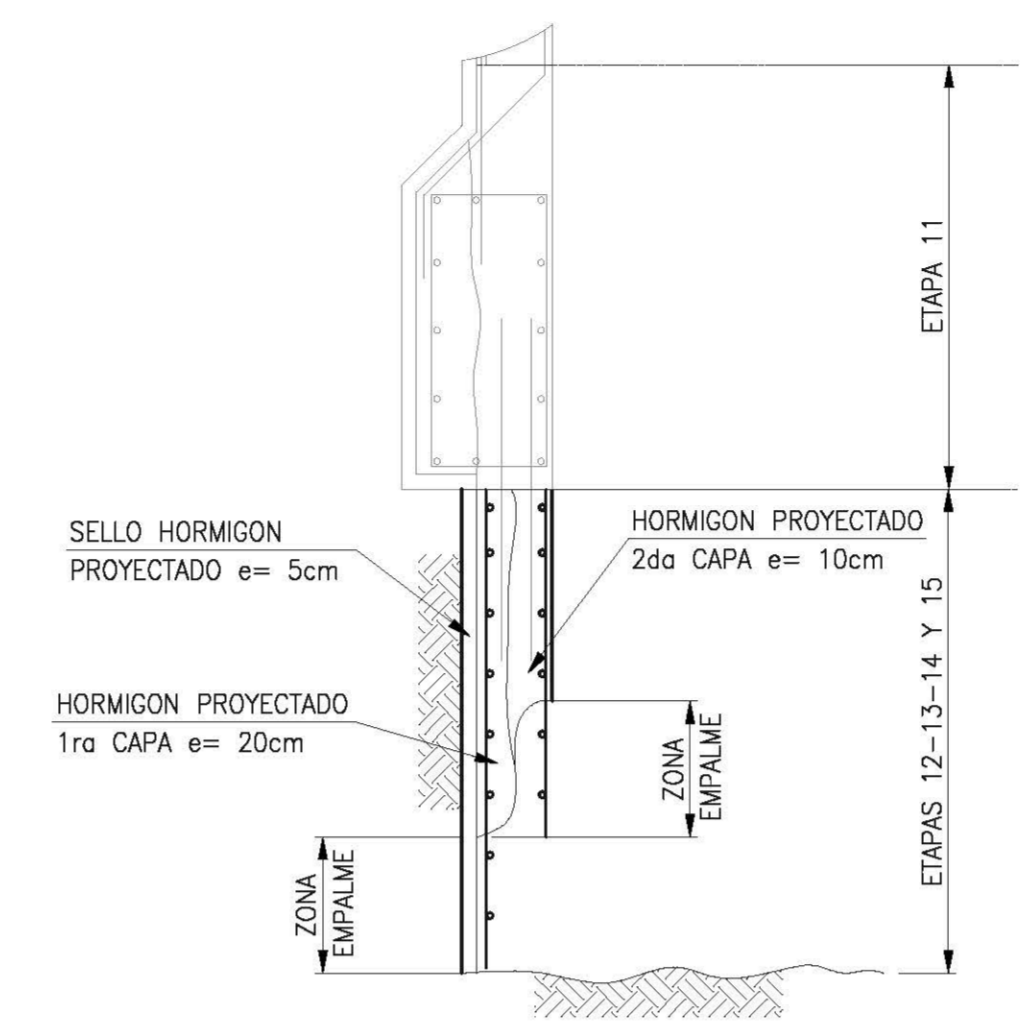
- ETAPAS 7-8-9 Y 10 (MANTO):
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPAS 3-4 Y 5.
  - EN ETAPA 12 Y 13 SE DEBERAN INSTALAR LOS PARAGUAS.VER DETALLE EN PLANO N°L3-ID-02-PLA-057-TU-004.
- ETAPA 11 (ANILLO SUPERIOR 2):
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPA 6.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO CON CAPAS DE MAXIMO 15 cm DE ESPESOR HASTA COMPLETAR 50 cm.
- ETAPAS 12-13-14 Y 15 (MANTO):
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPAS 3-4 Y 5.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO EN 35 cm, SALVO EN ZONAS DEL OJO DE LA GALERIA QUE QUEDA CON UN ESPESOR DE 20cm.
- ETAPA 16 (ANILLO DE REFUERZO INTERMEDIO):
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN LA ETAPA 6.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO CON CAPAS DE MAXIMO DE 15cm DE ESPESOR HASTA COMPLETAR 50 cm.
- ETAPAS 17-18-19 (MANTO):
- REPETIR LOS PASOS DE REALIZADOS EN LAS ETAPAS 3-4 Y 5.
- ETAPA 20 (ANILLO DE FUNDACION):
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN LA ETAPA 16, SALVO QUE EN ESTE CASO NO SE DEBEN COLOCAR LAS BARRAS ENTERRADAS DE EMPALME PARA LA ETAPA SIGUIENTE.
- NOTA:
- EN LA ETAPA DE EJECUCION DEL ANILLO SUPERIOR, ANTES DE HORMIGONAR LOS PILARES DE REFUERZO VERTICAL, SE DEBERA EXCAVAR LOCAL Y ANTICIPADAMENTE UNA PROFUNDIDAD MINIMA DE 20 cm PARA LA INSTALACION DEL CONECTOR MACANICO.



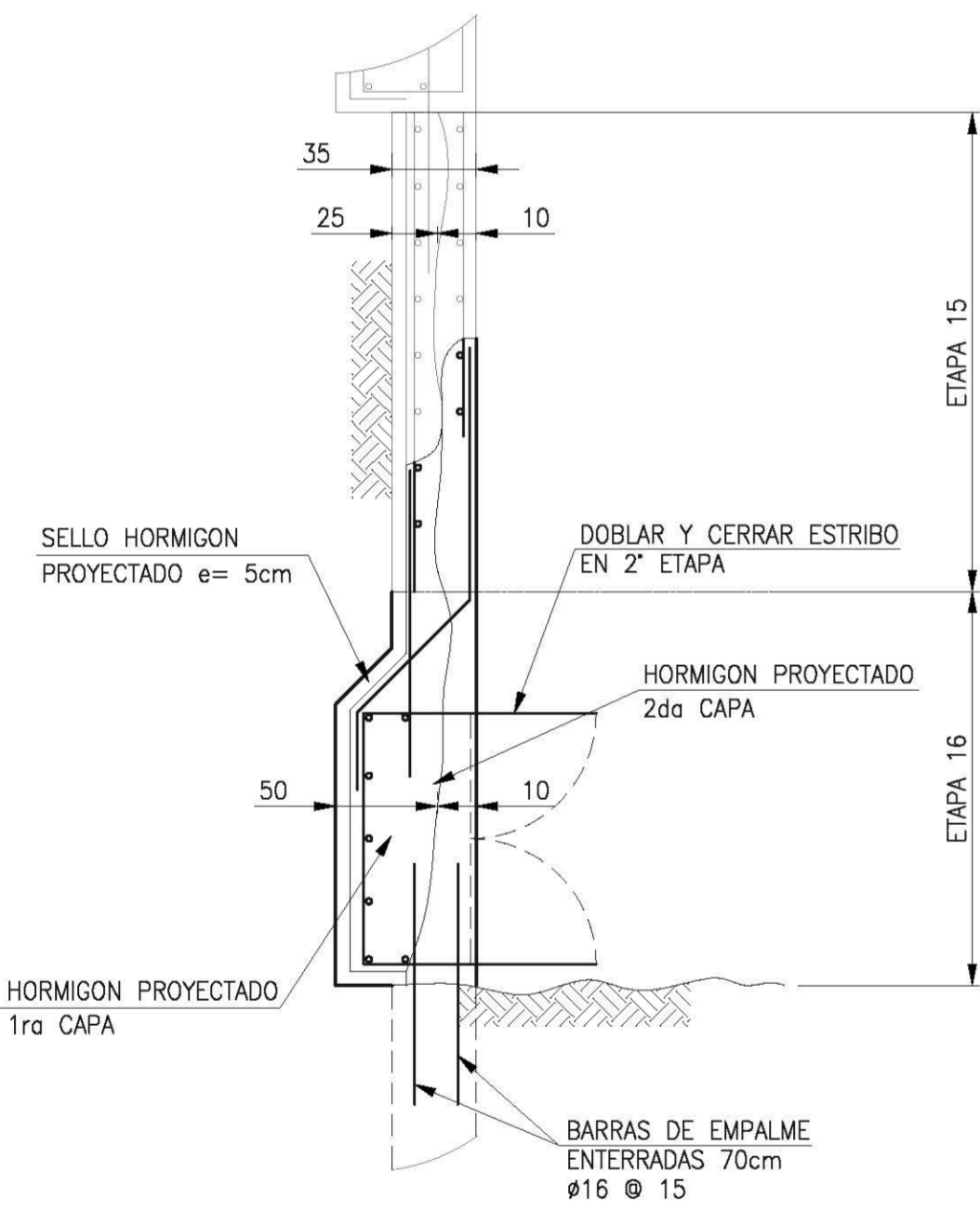
**ETAPAS DE EXCAVACION 7-8-9 Y 10**  
ESC. 1 : 25



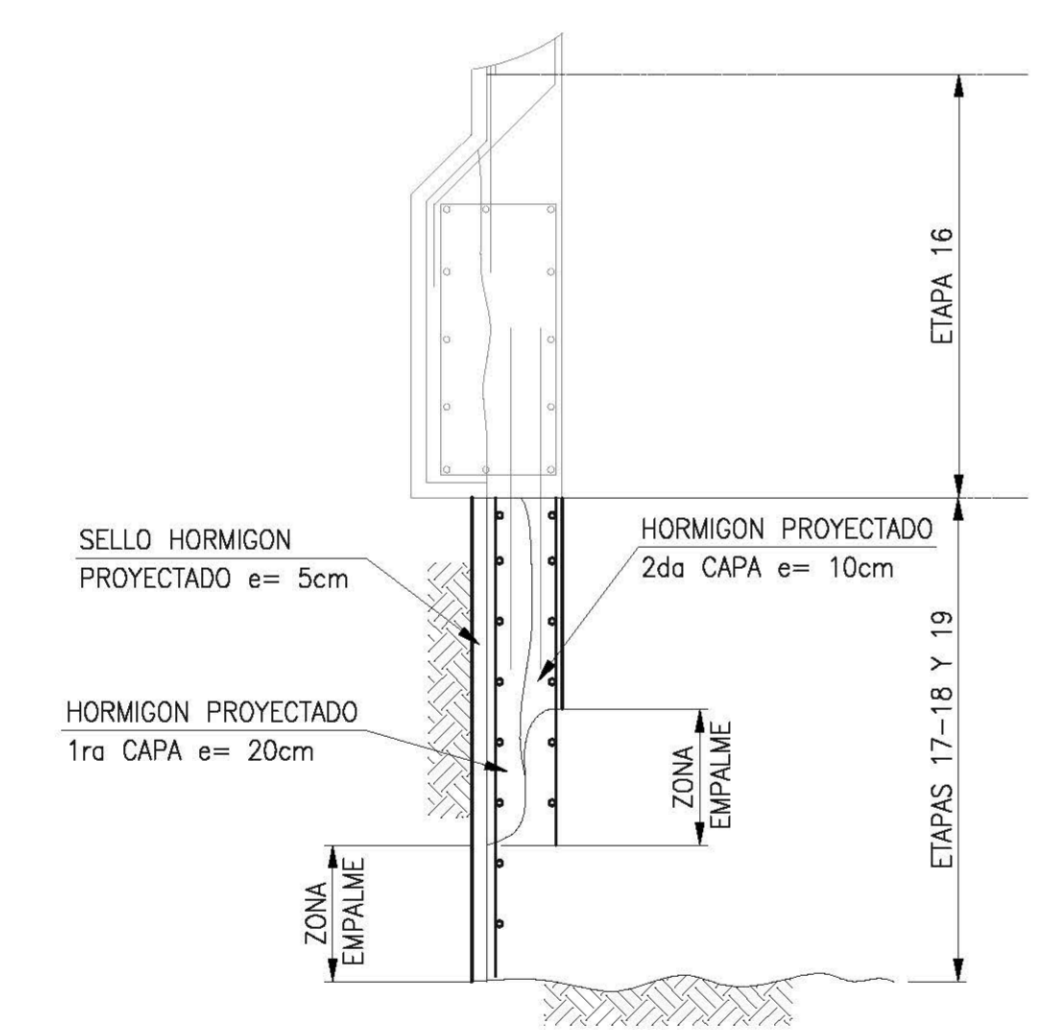
(ANILLO DE REFUERZO SUPERIOR 2)  
**ETAPA DE EXCAVACION 11**  
ESC. 1 : 25



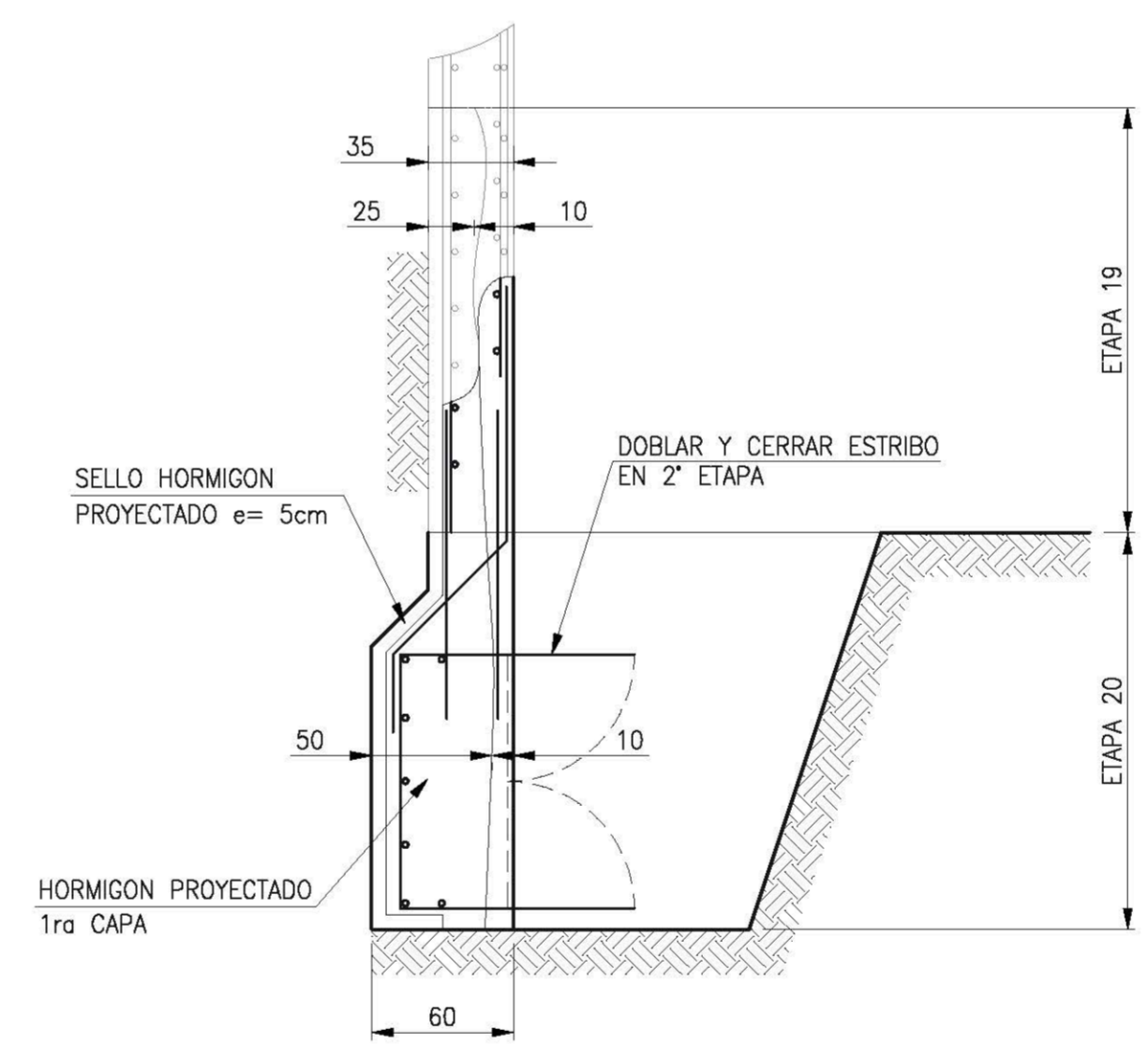
**ETAPAS DE EXCAVACION 12-13-14 Y 15**  
ESC. 1 : 25



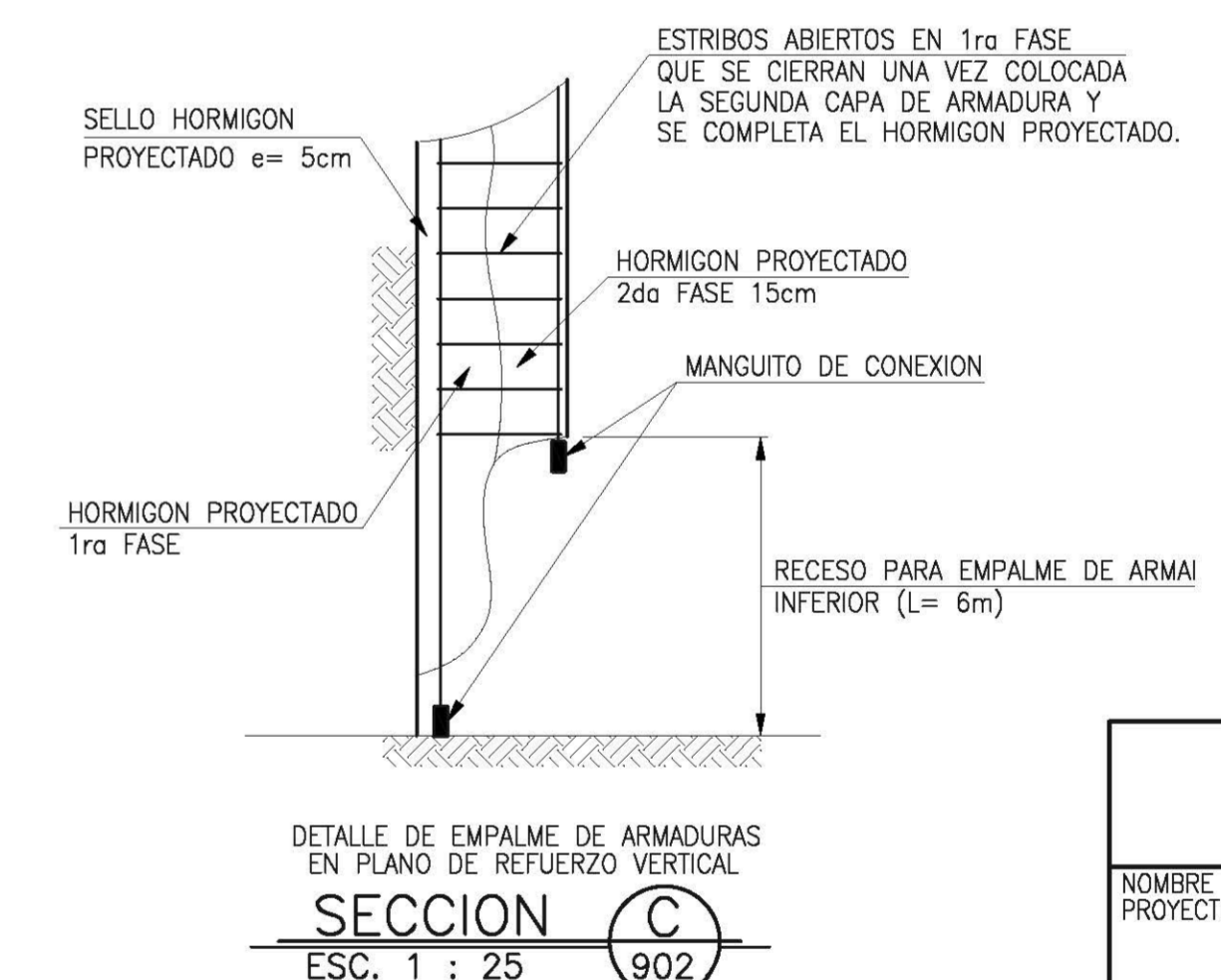
(ANILLO DE REFUERZO INTERMEDIO)  
**ETAPA DE EXCAVACION 16**  
ESC. 1 : 25



**ETAPAS DE EXCAVACION 17-18 Y 19**  
ESC. 1 : 25



(ANILLO DE FUNDACION)  
**ETAPA DE EXCAVACION 20**  
ESC. 1 : 25



DETALLE DE EMPALME DE ARMADURAS EN PLANO DE REFUERZO VERTICAL  
**SECCION C**  
ESC. 1 : 25

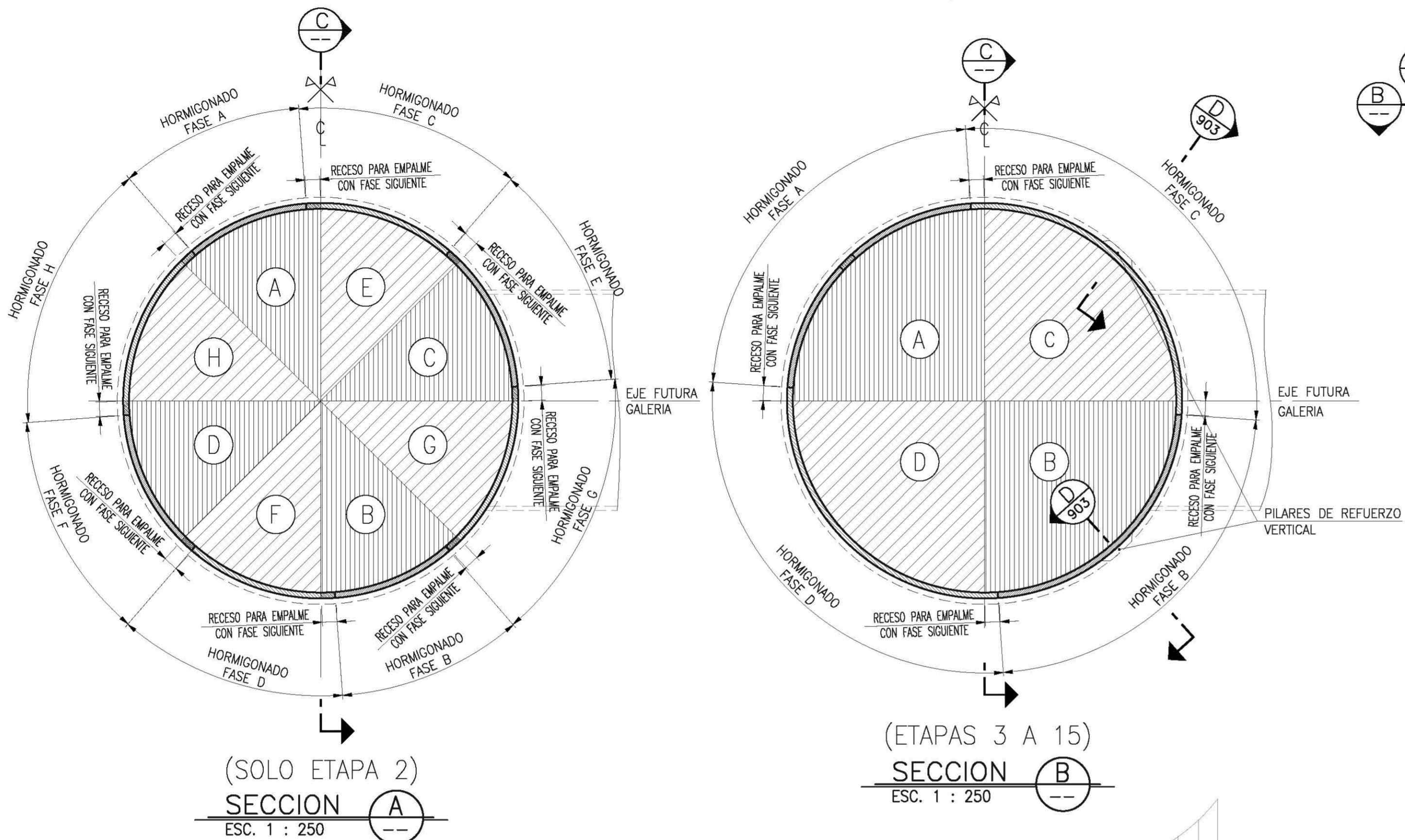
<b>METRO S.A.</b> GERENCIA DE PROYECTO LINEA 3		
NOMBRE PROYECTISTA	FECHA	FIRMA
SUBGERENCIA OOC Y ARQUITECTURA	FECHA	FIRMA
GERENCIA DE ING. Y TECNOLOGIA	FECHA	FIRMA
NOMBRE CONTRATISTA	FECHA	FIRMA

		<b>METRO S.A.</b> INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3	
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS			
Especialidad TUNELES	Contrato N° 112150	Plano N° L3-ID-02-PLA-057-TU-903-R01	
INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES <b>PIQUE DE CONSTRUCCION EL CORTIJO</b> <b>PIQUE - PLANO 2 DE 2</b> <b>SECUENCIA CONSTRUCTIVA</b>			
ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REEMPLAZA A
INDICADAS	31.08.2012		L3-ID-01-PLA-057-TU-902-R0C

- NOTAS:
- 1.- DIMENSIONES EN CENTIMETROS (S.I.C.)
  - 2.- VER NOTAS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-057-TU-901.

REV	FECHA	DESCRIPCION	PROY.	CALC.	REV.	ASE.	APR. J.E.	APR. D.P.
1	11.01.13	MODIFICACION GENERAL POR CAMBIO DE TRAZADO	P.P.G.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
0	05.10.12	EMITIDO PARA CONSTRUCCION	L.P.B.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
B	07.09.12	EMITIDO PARA APROBACION	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
A	31.08.12	EMITIDO PARA COORDINACION INTERNA	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.

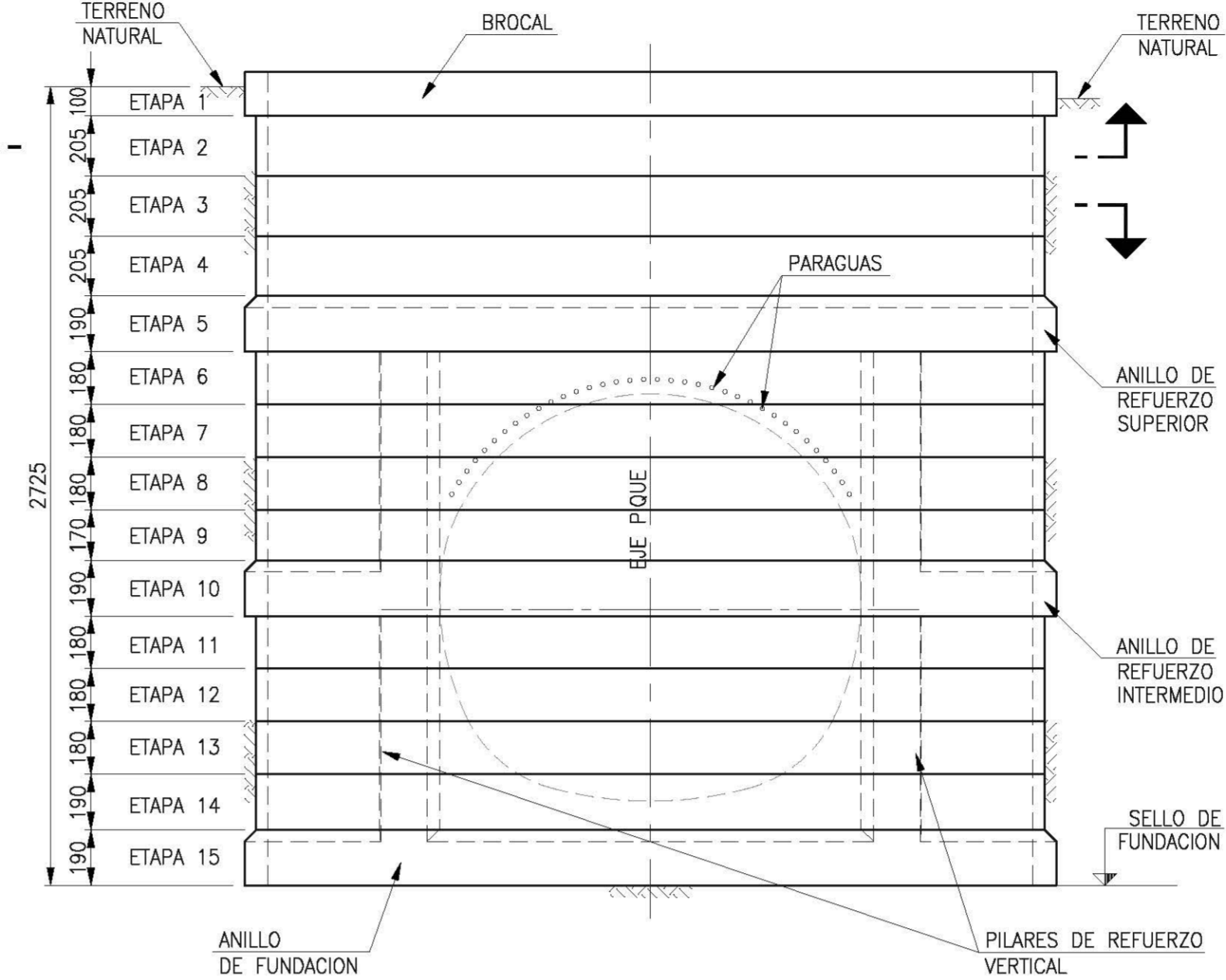
SECUENCIA DE EXCAVACION Y SOSTENIMIENTO PIQUE



(SOLO ETAPA 2)  
SECCION A  
ESC. 1 : 250

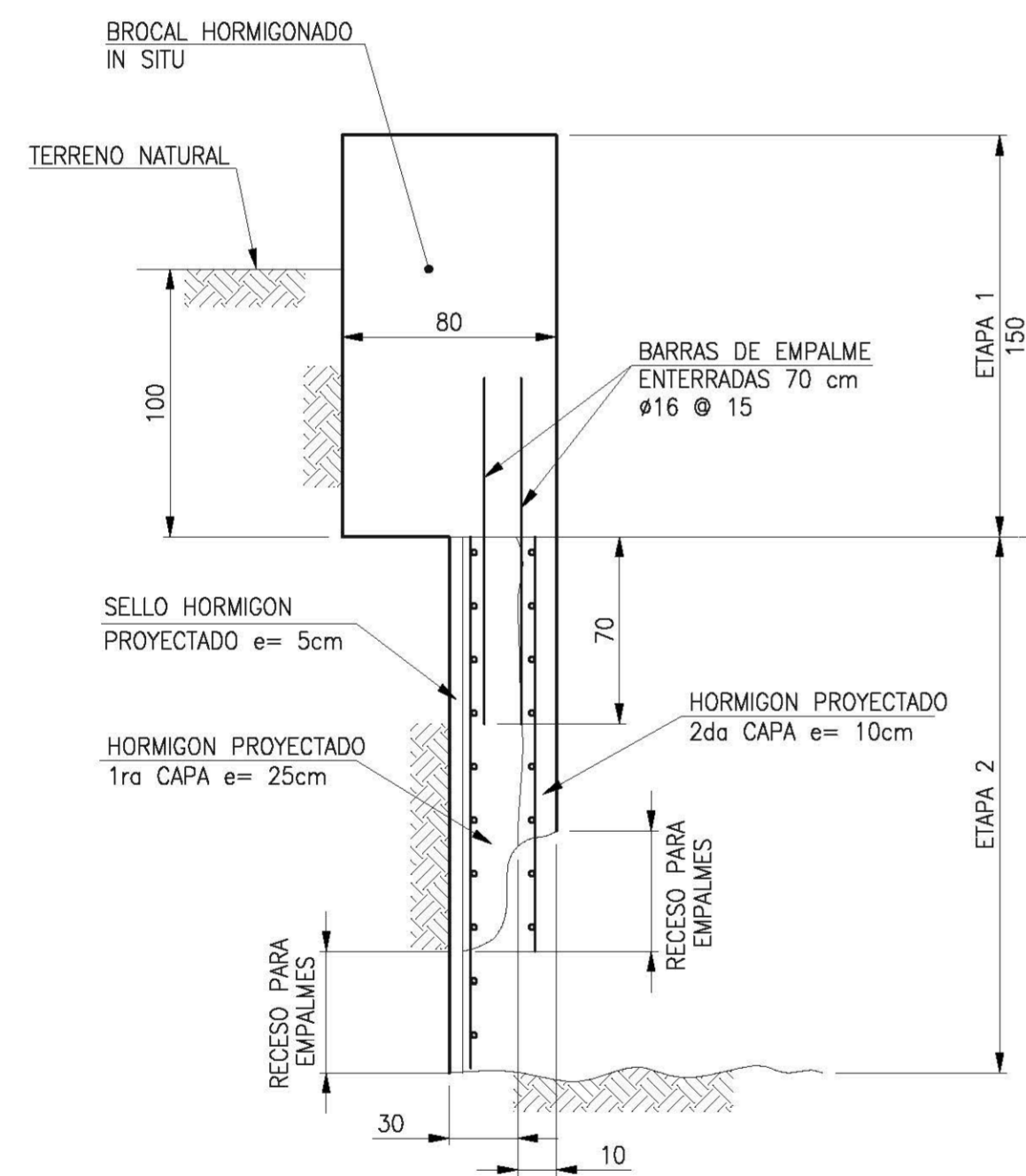
(ETAPAS 3 A 15)  
SECCION B  
ESC. 1 : 250

SECUENCIA DE CONSTRUCCION PIQUE

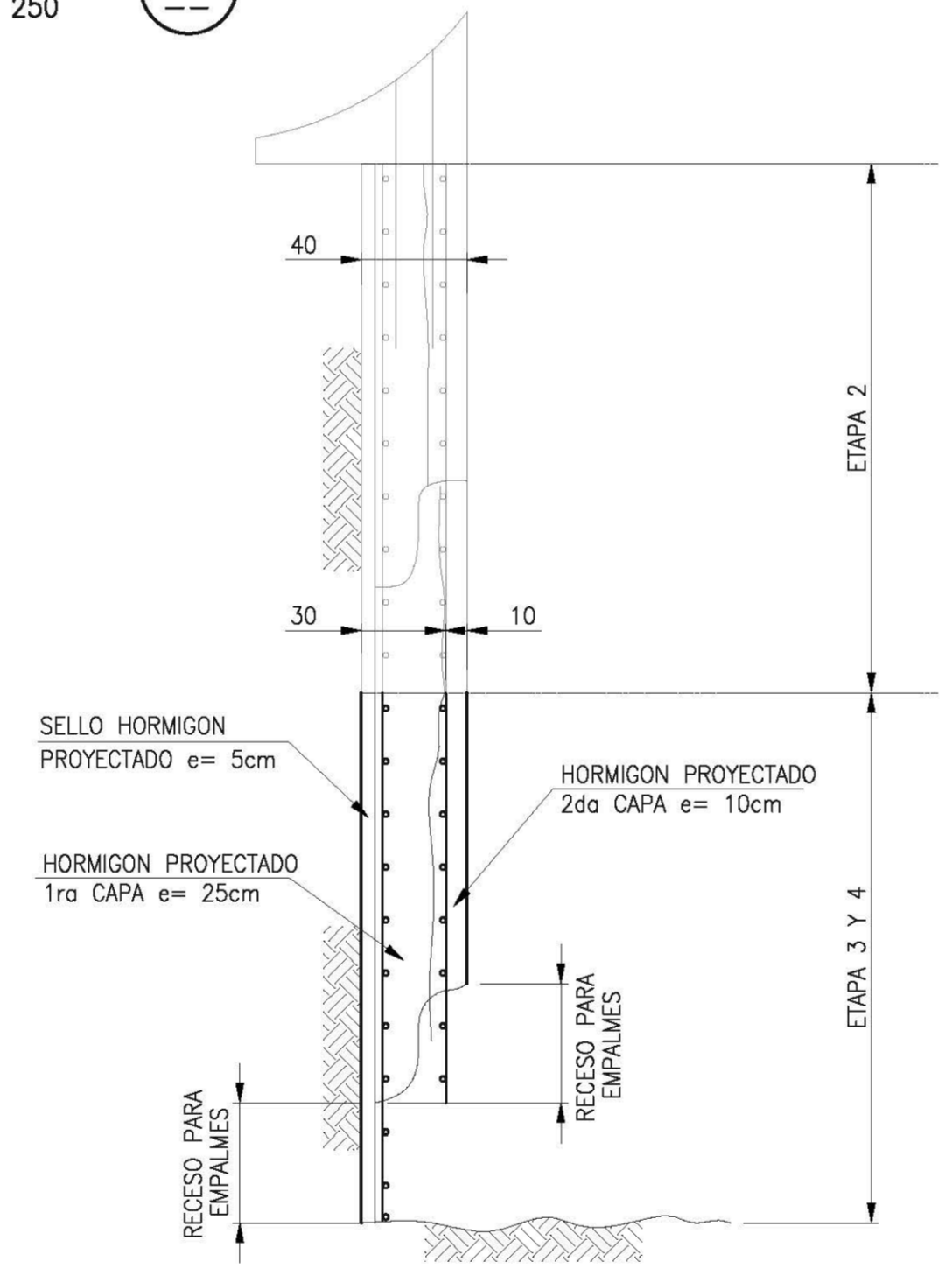


SECCION C  
ESC. 1 : 200  
NOTA: EN ETAPA 8 Y 9 SE DEBEN INSTALAR LOS PARAGUAS

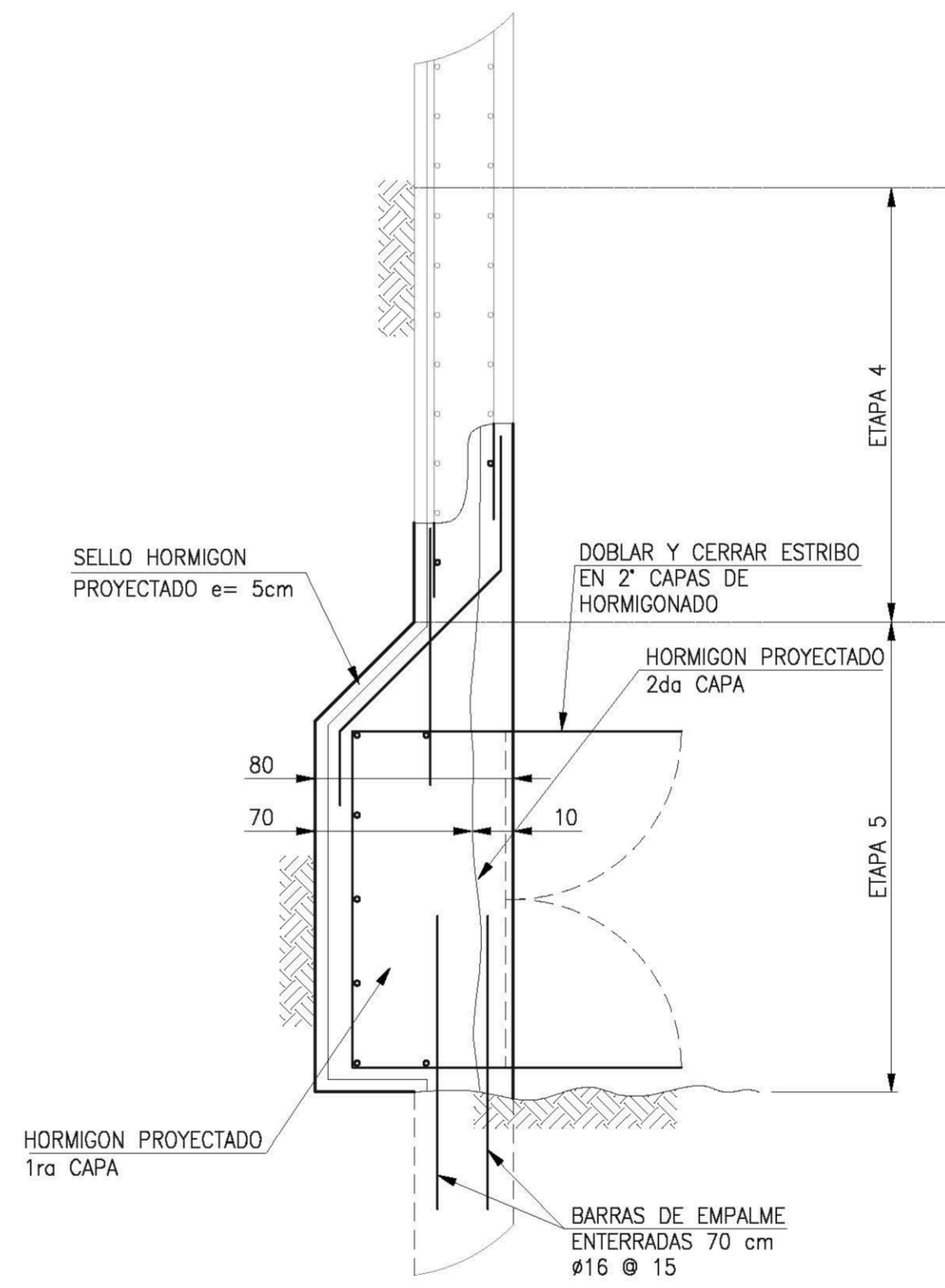
- ETAPA 1: (BROCAL)
- EXCAVAR PRIMER BANCO DE 100 cm DE PROFUNDIDAD EN FORMA MASIVA EN TODA EL AREA DEL PIQUE, COLOCAR ARMADURAS Y HORMIGONAR CONTRA TERRENO, EN CASO QUE EL SUELO SEA INESTABLE O DE MALA CALIDAD EXCAVAR EN TALUD Y HORMIGONAR CONTRA MOLDAJE. SE DEBERAN DEJAR BARRAS 16 @ 15 ENTERRADAS EN FORMA MANUAL A 70 cm EN EL SUELO PARA SU POSTERIOR EMPALME CON LA MALLA ELECTROSOLDADA DE LA ETAPA SIGUIENTE.
- ETAPA 2: (PRIMER ANILLO DEL MANTO)
- SE PODRA INICIAR ESTA ETAPA SOLO CUANDO EL HORMIGON DEL BROCAL ALCANCE LA RESISTENCIA DE PROYECTO.
  - LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARAN EN OCTAVOS ALTERNADAMENTE, COMO SE MUESTRA EN LA SECCION A.
- 1º EXCAVAR BAJO EL NIVEL DE ETAPA 1, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D-E-F-G-H) SEGUN SE INDICA EN SECCION A Y EN PROFUNDIDAD SEGUN SE INDICA EN SECCION C.
  - 2º COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e=5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
  - 3º COLOCAR 1ª MALLA ELECTROSOLDADA EMPALMADA CON ARMADURA ENTERRADA EN 1ra ETAPA Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO ESPESOR 25 cm, DEJANDO SIN HORMIGONAR Y DESCOBERTA 1ª MALLA EN 45 cm APROXIMADAMENTE, PARA FUTURO EMPALME VERTICAL Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL.
  - 4º COLOCAR 2ª MALLA ELECTROSOLDADA EMPALMADA CON ARMADURA ENTERRADA EN 1ra ETAPA Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR 40 cm DE ESPESOR, DEJANDO SIN CUBRIR PARTE DE LA MALLA PARA PERMITIR SU FUTURO EMPALME VERTICAL Y LATERAL (45 cm PARA MALLA, 90 cm PARA SUPLES Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL).
- ETAPAS 3 Y 4: (MANTO)
- DESDE LA ETAPA 3 HASTA LA ETAPA 15, LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARAN POR CUARTOS Y ALTERNADAMENTE, COMO SE MUESTRA EN SECCION B. DE ACUERDO A LA SIGUIENTE SECUENCIA:
- 1º EXCAVAR BAJO EL NIVEL DE ETAPA 2, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D) SEGUN SE INDICA EN SECCION B Y EN PROFUNDIDAD SEGUN SE INDICA EN SECCION C.
  - 2º COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e=5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
  - 3º COLOCAR 1ª MALLA ELECTROSOLDADA EMPALMADA CON MALLA SUPERIOR Y LATERAL Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR ESPESOR DE 25 cm DEJANDO SIN HORMIGONAR Y DESCOBERTA 1ª MALLA EN 45 cm APROXIMADAMENTE PARA FUTURO EMPALME VERTICAL Y 30 cm PARA EMPALME LATERAL.
  - 4º COLOCAR 2ª MALLA ELECTROSOLDADA EMPALMADA CON MALLA SUPERIOR Y LATERAL Y COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR 40 cm DE ESPESOR DEJANDO SIN CUBRIR PARTE DE LA MALLA PARA PERMITIR SU FUTURO EMPALME VERTICAL Y LATERAL.
- ETAPA 5: (ANILLO SUPERIOR)
- LA EXCAVACION Y EL SOSTENIMIENTO SE EJECUTARA POR CUARTOS ALTERNADAMENTE, COMO SE MUESTRA EN SECCION B, DE ACUERDO A LA SIGUIENTE SECUENCIA:
- 1º EXCAVAR BAJO EL NIVEL DE ETAPA 4, EN FORMA ALTERNADA (A-B-C-D) SEGUN SE INDICA EN SECCION B Y EN PROFUNDIDAD SEGUN SE INDICA EN SECCION C.
  - 2º COLOCAR SELLO HORMIGON PROYECTADO e=5 cm. EVENTUALMENTE COLOCAR UN SISTEMA DE DRENAJE, CAPTAR Y ENTUBAR FILTRACIONES (VER DETALLE).
  - 3º COLOCAR BARRAS # 16 @ 15 ENTERRADAS EN FORMA MANUAL A 70 cm EN EL SUELO, PARA EMPALME VERTICAL.
  - 4º COLOCAR ARMADURAS EXTERNAS Y LOS ESTRIBOS ABIERTOS. COMPLETAR EL HORMIGON PROYECTADO CON CAPAS DE 15 cm MAXIMO, COMPLETAR 70 cm DE ESPESOR. COLOCAR HORMIGON PROYECTADO CON PITON EN ANGULO Y DISTANCIA APROPIADA DE MANERA DE MINIMIZAR LA SOMBRA DE LAS ARMADURAS.
  - 5º COLOCAR ARMADURAS INTERNAS Y BARRAS DOBLADAS PARA LA SIGUIENTE ETAPA, LOS ESTRIBOS SE DOBLAN Y CIERRAN PARA COLOCAR HORMIGON PROYECTADO HASTA COMPLETAR EL 2do CICLO DE ESPESOR 10 cm. COLOCAR HORMIGON PROYECTADO CON PITON EN ANGULO Y DISTANCIA APROPIADA DE MANERA DE MINIMIZAR LA SOMBRA DE LAS ARMADURAS.



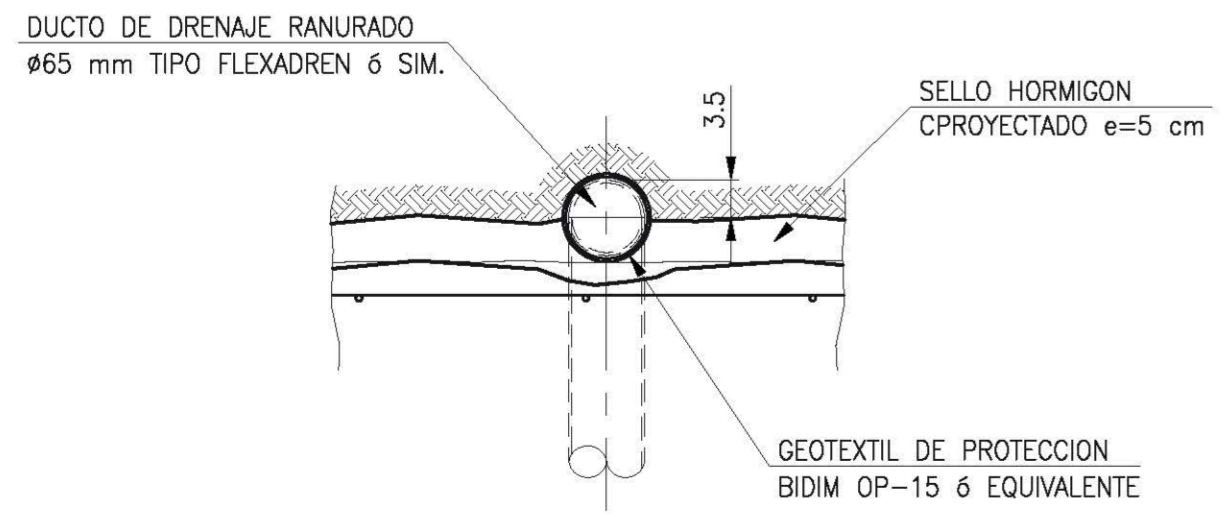
ETAPAS DE EXCAVACION 1 Y 2  
ESC. 1 : 25



ETAPAS DE EXCAVACION 3 Y 4  
ESC. 1 : 25



(ANILLO DE REFUERZO SUPERIOR)  
ETAPA DE EXCAVACION 5  
ESC. 1 : 25



DETALLE DE DRENAJE EVENTUAL  
ESC. 1 : 5

- NOTAS:
- 1.- DIMENSIONES EN CENTIMETROS (S.I.C.).
  - 2.- VER NOTAS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-205-TU-902.

REV	FECHA	DESCRIPCION	PROY.	CALC.	REV.	ASE.	APR. J.E.	APR. D.P.

<b>METRO S.A.</b> GERENCIA DE PROYECTO LINEA 3		
NOMBRE PROYECTISTA	FECHA	FIRMA
SUBGERENCIA OCCC Y ARQUITECTURA	FECHA	FIRMA
GERENCIA DE ING. Y TECNOLOGIA	FECHA	FIRMA
NOMBRE CONTRATISTA	FECHA	FIRMA

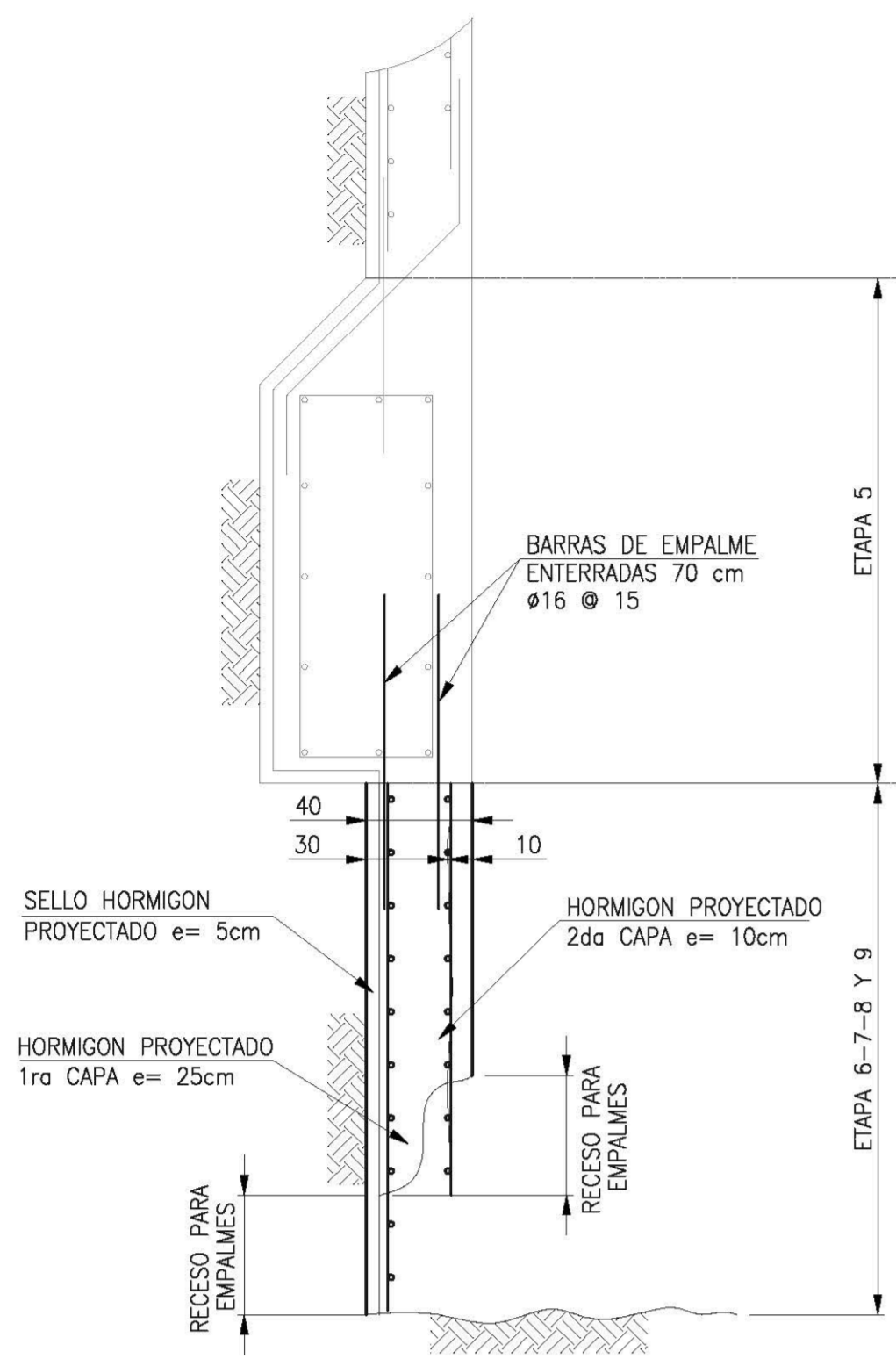
**METRO S.A.**  
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3

CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS

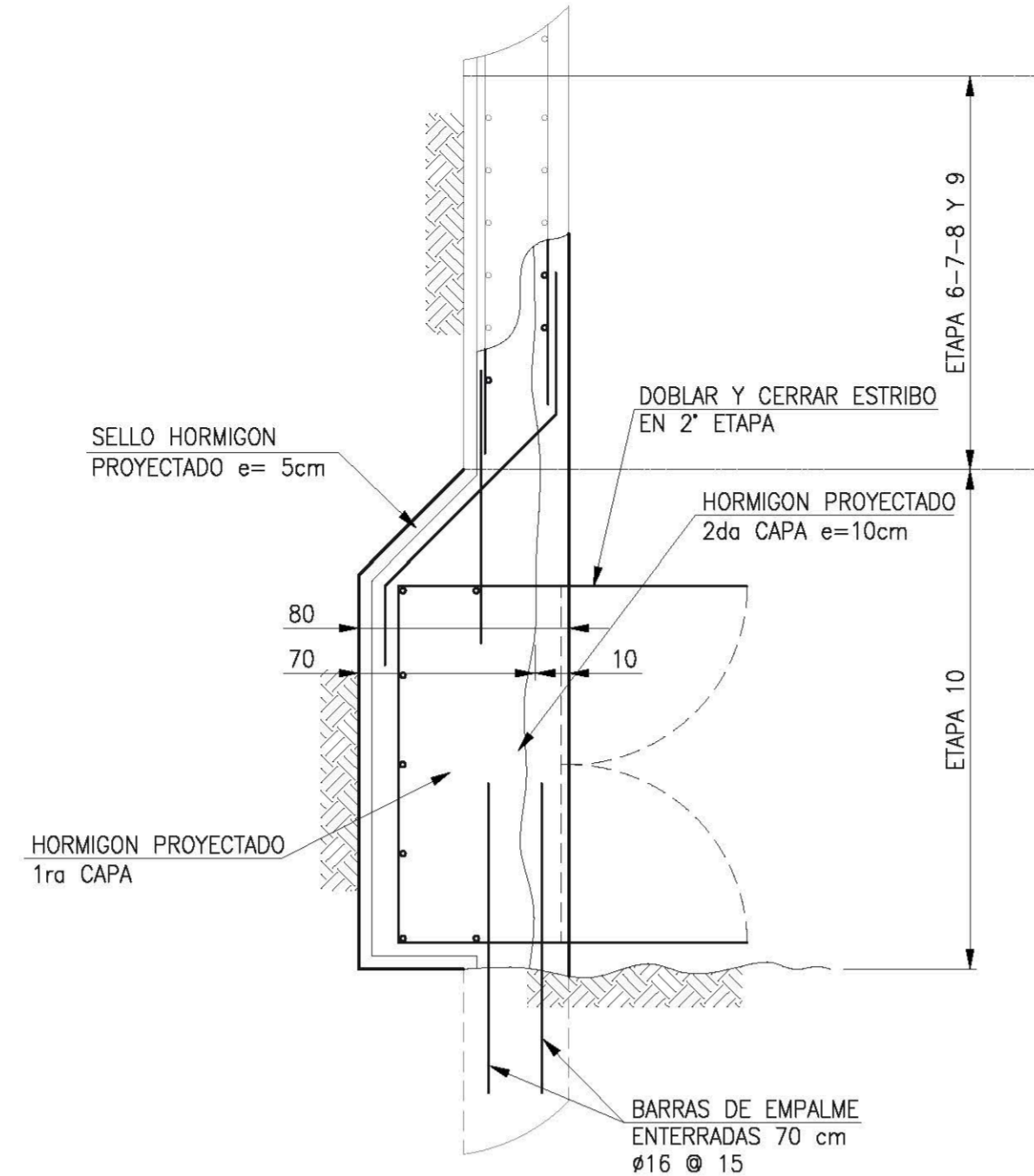
**ARCADIS** **ARA** **WorleyParsons**

Especialidad TUNELES	Contrato N° 112150	Plano N° L3-ID-02-PLA-205-TU-902-R01
CONTENIDO	INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES <b>ESTACION CONCHALI</b> <b>PIQUE - PLANTA Y ELEVACION</b> <b>SECUENCIA CONSTRUCTIVA</b>	
ESCALA	FECHA	REFERENCIA
INDICADAS	10.07.2012	

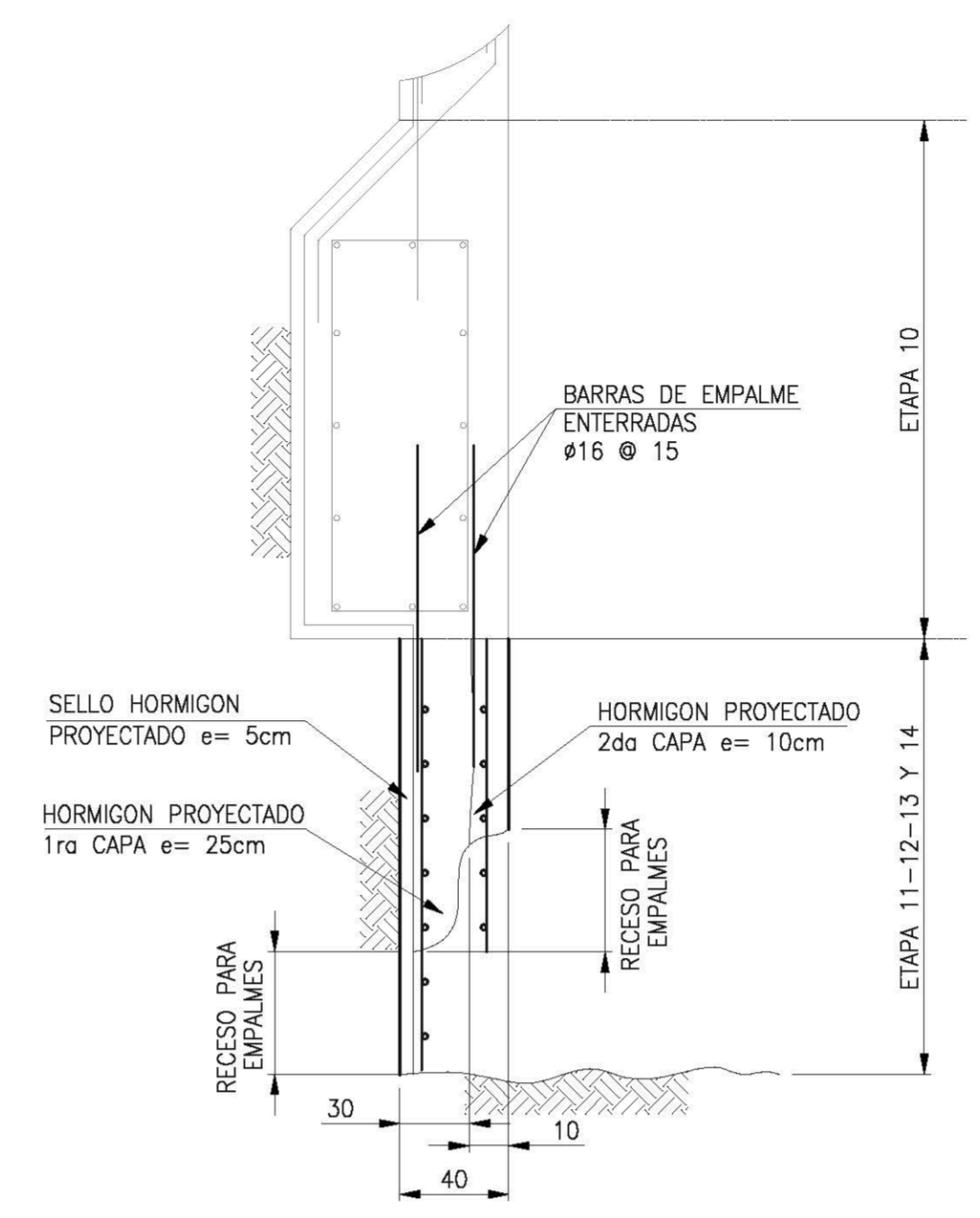
SECUENCIA DE CONSTRUCCION PIQUE (CONTINUACION)



ETAPAS DE EXCAVACION 6-7-8 Y 9  
ESC. 1 : 25

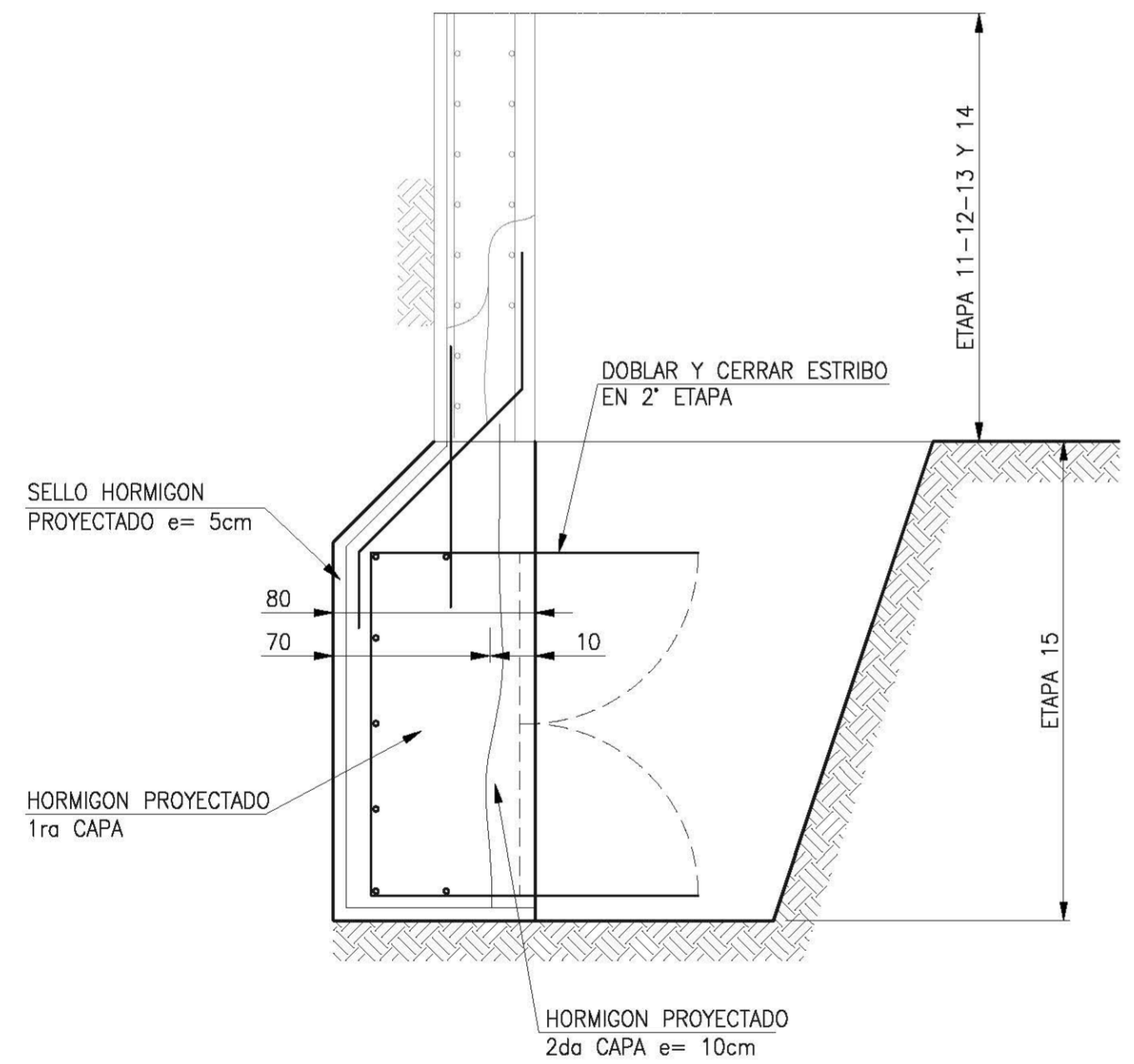


(ANILLO INTERMEDIO)  
ETAPA DE EXCAVACION 10  
ESC. 1 : 25

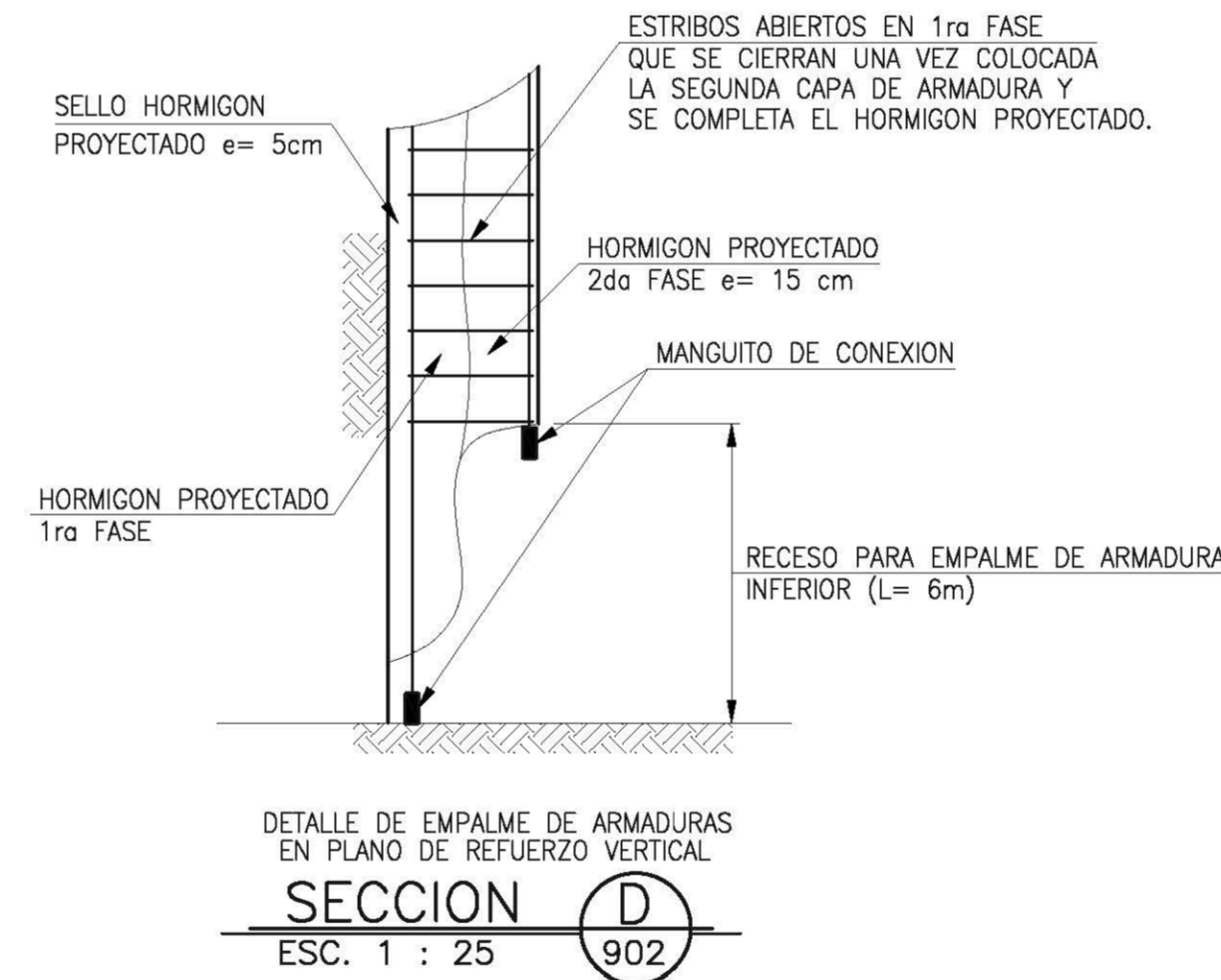


ETAPAS DE EXCAVACION 11-12-13 Y 14  
ESC. 1 : 25

- ETAPAS 6-7-8 Y 9: (MANTO)
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPA 3 Y 4.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO EN 40 cm, SALVO EN ZONAS DEL OJO DE LA GALERIA QUE QUEDA CON UN ESPESOR DE 20 cm.
  - EN ETAPA 8 Y 9 SE DEBERAN INSTALAR LOS PARAGUAS, VER DETALLE EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-205-TU-004.
- ETAPA 10: (ANILLO DE REFUERZO INTERMEDIO)
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPA 5.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO CON CAPAS DE MAXIMO 15 cm DE ESPESOR, COMPLETAR 70 cm.
- ETAPAS 11-12-13 Y 14: (MANTO)
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN ETAPA 3 Y 4.
  - COMPLETAR HORMIGON PROYECTADO EN 40 cm, SALVO EN ZONAS DEL OJO DE LA GALERIA QUE QUEDA CON UN ESPESOR DE 20 cm.
- ETAPA 15: (ANILLO DE FUNDACION)
- REPETIR LOS PASOS REALIZADOS EN LA ETAPA 10, SALVO QUE EN ESTE CASO NO SE DEBEN COLOCAR LAS BARRAS ENTERRADAS DE EMPALME PARA LA ETAPA SIGUIENTE.
- NOTA:
- EN LA ETAPA DE EJECUCION DEL ANILLO SUPERIOR, ANTES DE HORMIGONAR LOS PILARES DE REFUERZO VERTICAL, SE DEBERA EXCAVAR LOCALMENTE UNA PROFUNDIDAD MINIMA DE 20 cm PARA LA INSTALACION DEL CONECTOR MECANICO.



(ANILLO DE FUNDACION)  
ETAPA DE EXCAVACION 15  
ESC. 1 : 25



NOTAS:  
1.- DIMENSIONES EN CENTIMETROS (S.I.C.).  
2.- VER NOTAS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-205-TU-905.

REV	FECHA	DESCRIPCION	PROY.	CALC.	REV.	ASE.	APR. J.E.	APR. D.P.	INDICADAS	FECHA	REFERENCIA	REEMPLAZA A	REV
1	11.01.13	MODIFICACION GENERAL POR CAMBIO DE TRAZADO	J.H.V.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.					
0	05.10.12	EMITIDO PARA APROBACION	J.H.V.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.					
C	07.09.12	EMITIDO PARA APROBACION	J.H.V.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.					
B	13.07.12	EMITIDO PARA APROBACION	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.					
A	10.07.12	EMITIDO PARA COORDINACION INTERNA	E.H.D.	E.G.G.	G.V.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.					

<b>METRO S.A.</b> GERENCIA DE PROYECTO LINEA 3		
NOMBRE PROYECTISTA	FECHA	FIRMA
SUBGERENCIA OCCC Y ARQUITECTURA	FECHA	FIRMA
GERENCIA DE ING. Y TECNOLOGIA	FECHA	FIRMA
NOMBRE CONTRATISTA	FECHA	FIRMA

**METRO S.A.**  
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3

CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS

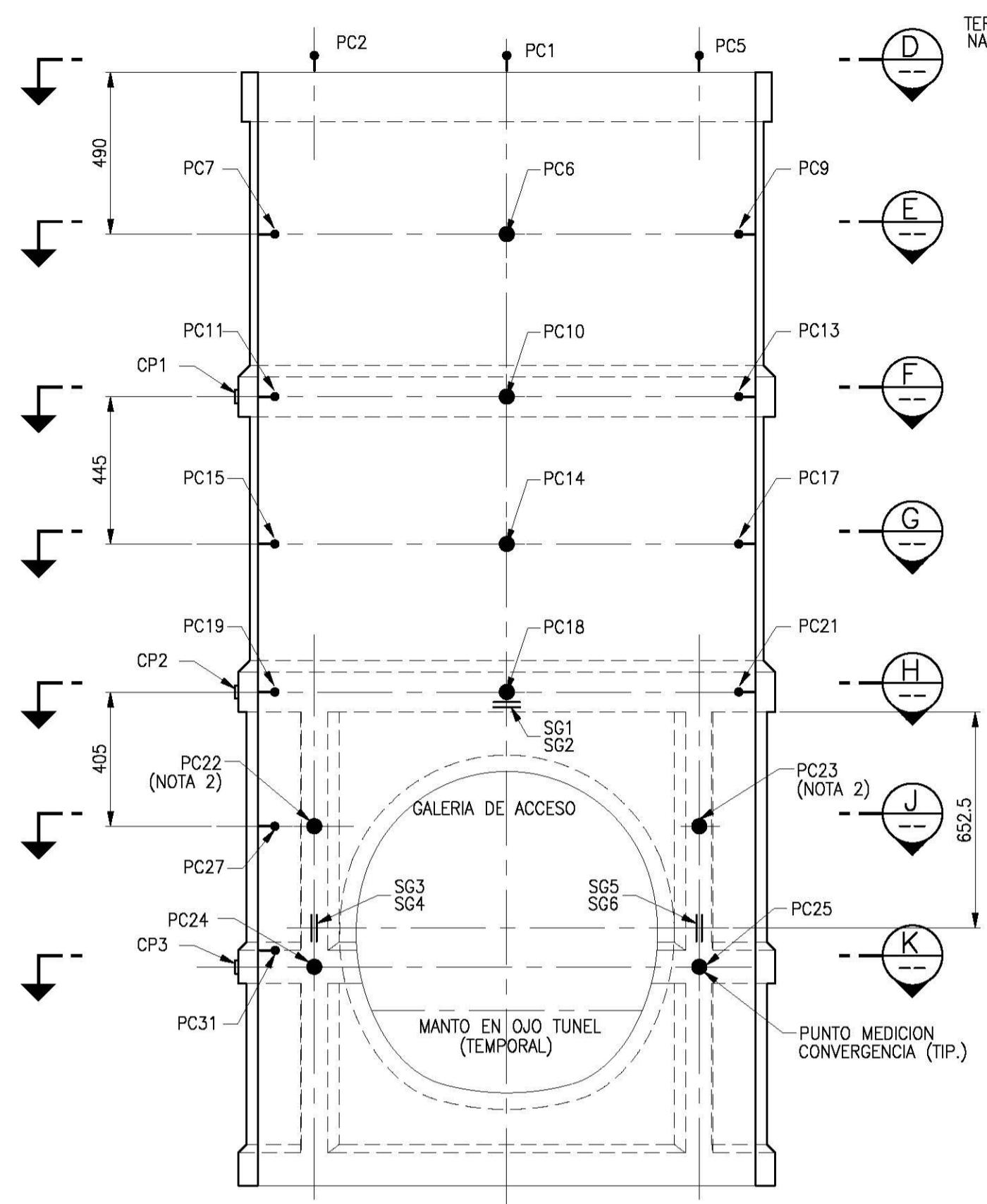
**ARCADIS** **ARA** **WorleyParsons**

Especialidad	Contrato N°	Plano N°
TUNELES	I12150	L3-ID-02-PLA-205-TU-903-R01
CONTENIDO	INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES <b>ESTACION CONCHALI</b> <b>PIQUE - DETALLES</b> <b>SECUENCIA CONSTRUCTIVA</b>	
ESCALA	FECHA	REFERENCIA
INDICADAS	10.07.2012	

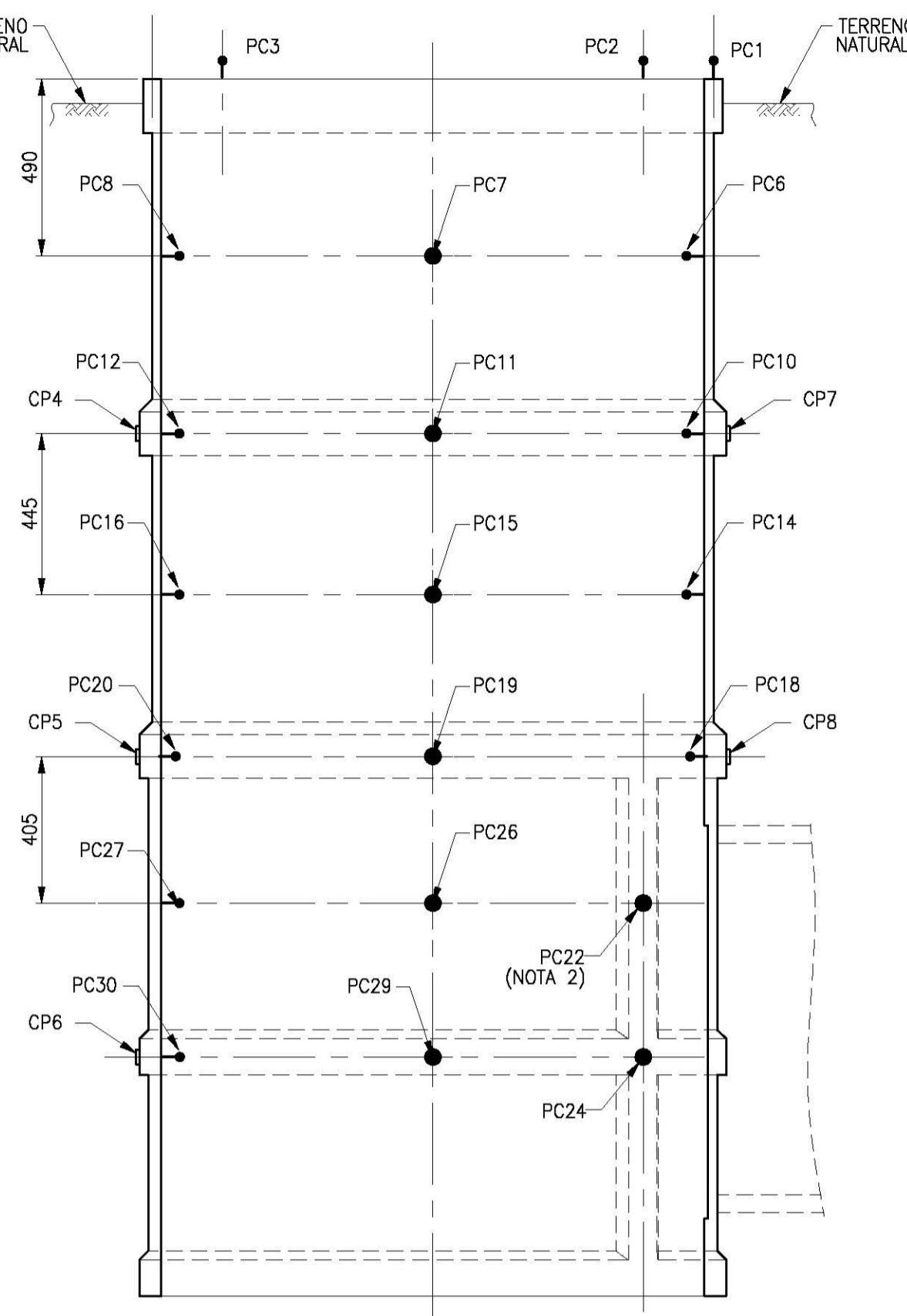
## **Anexo B: Sistema de Monitoreo.**

1. Detalle del sistema de monitoreo Pique El Cortijo
2. Detalle del sistema de monitoreo Pique Plaza Chacabuco

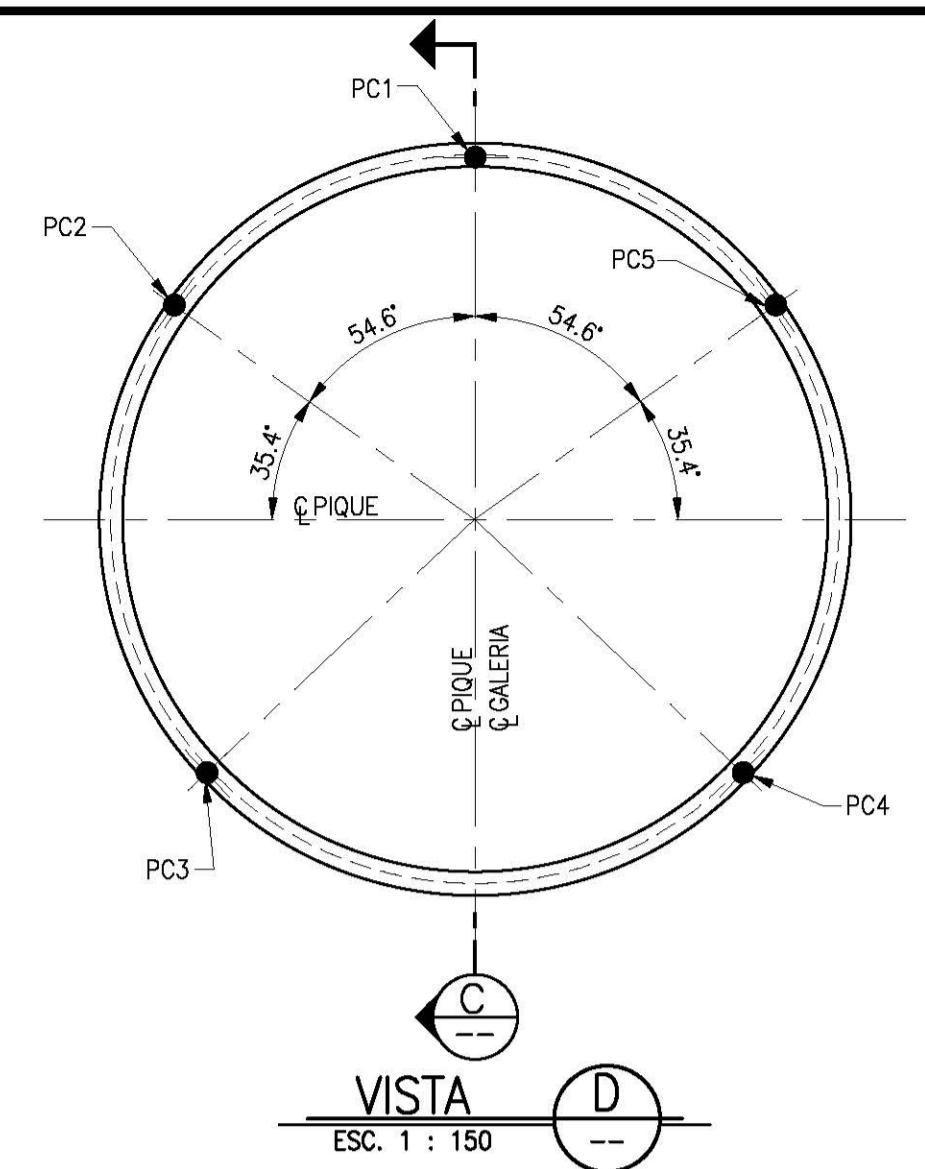




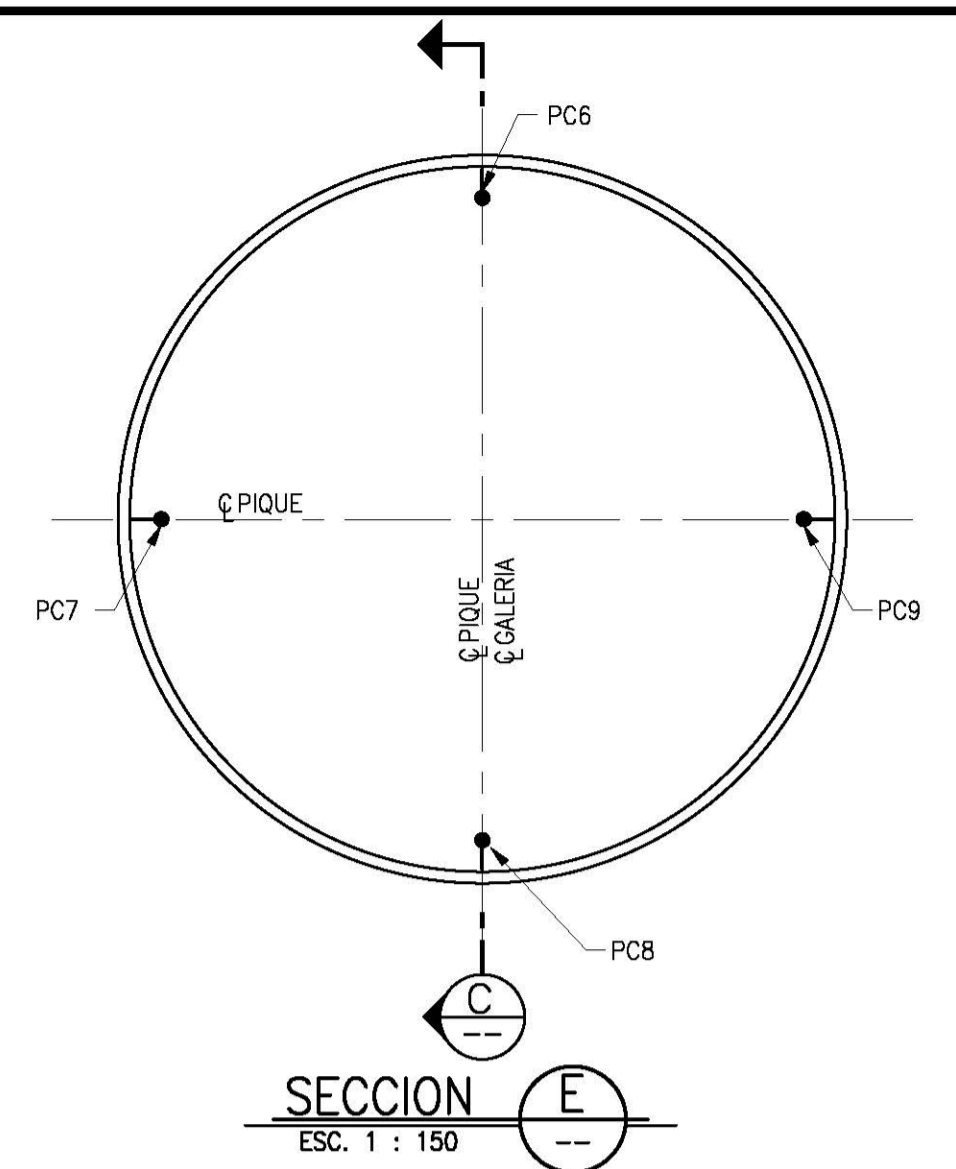
SECCION B  
ESC. 1 : 150



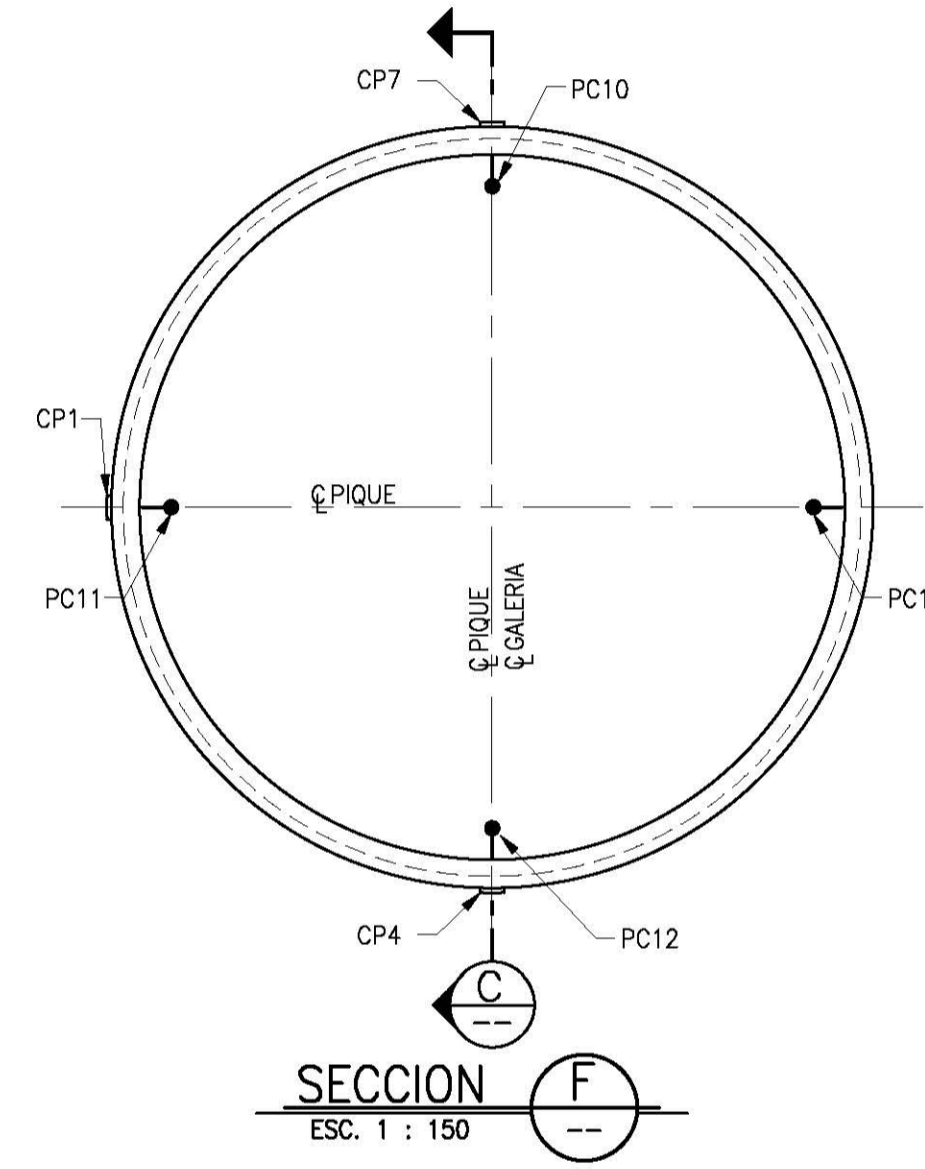
SECCION C  
ESC. 1 : 150



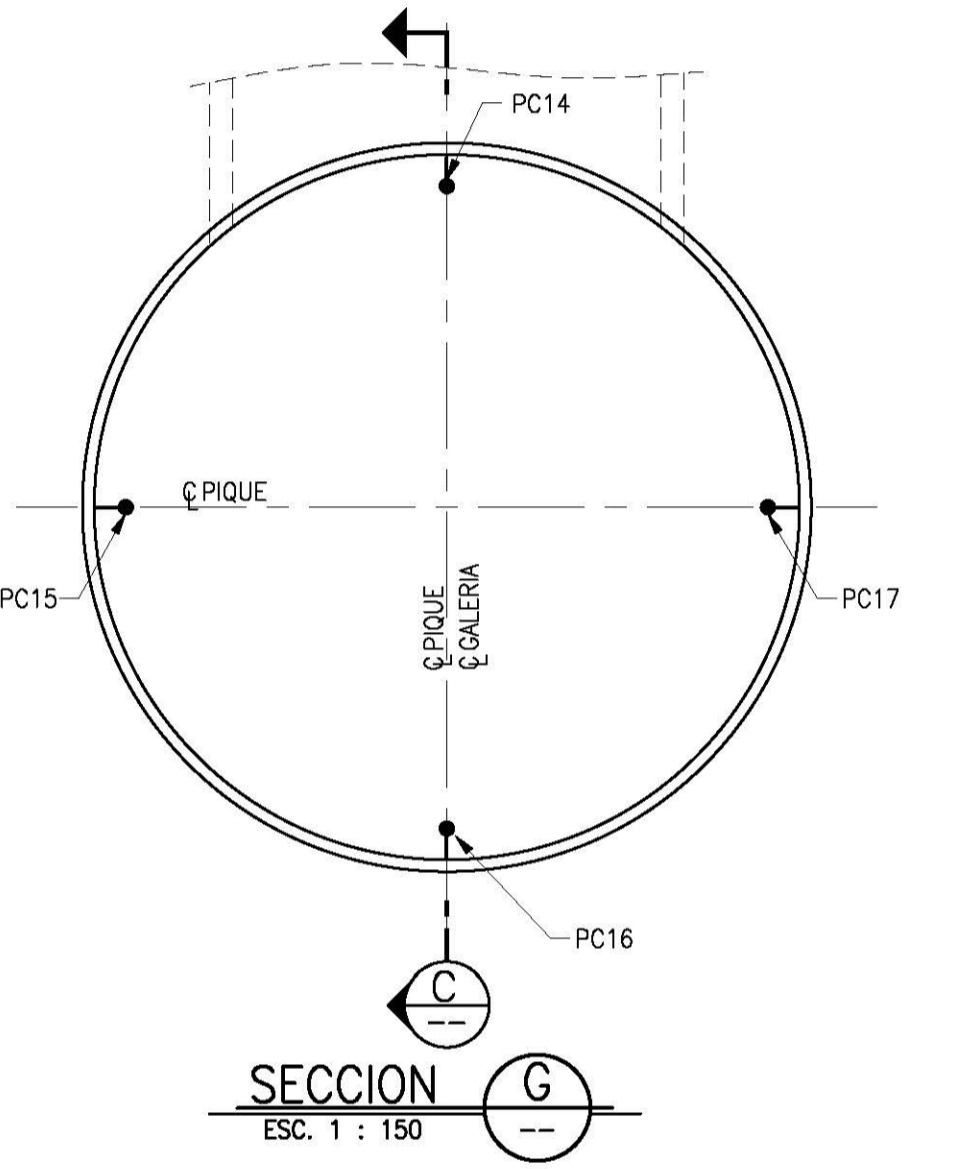
VISTA D  
ESC. 1 : 150



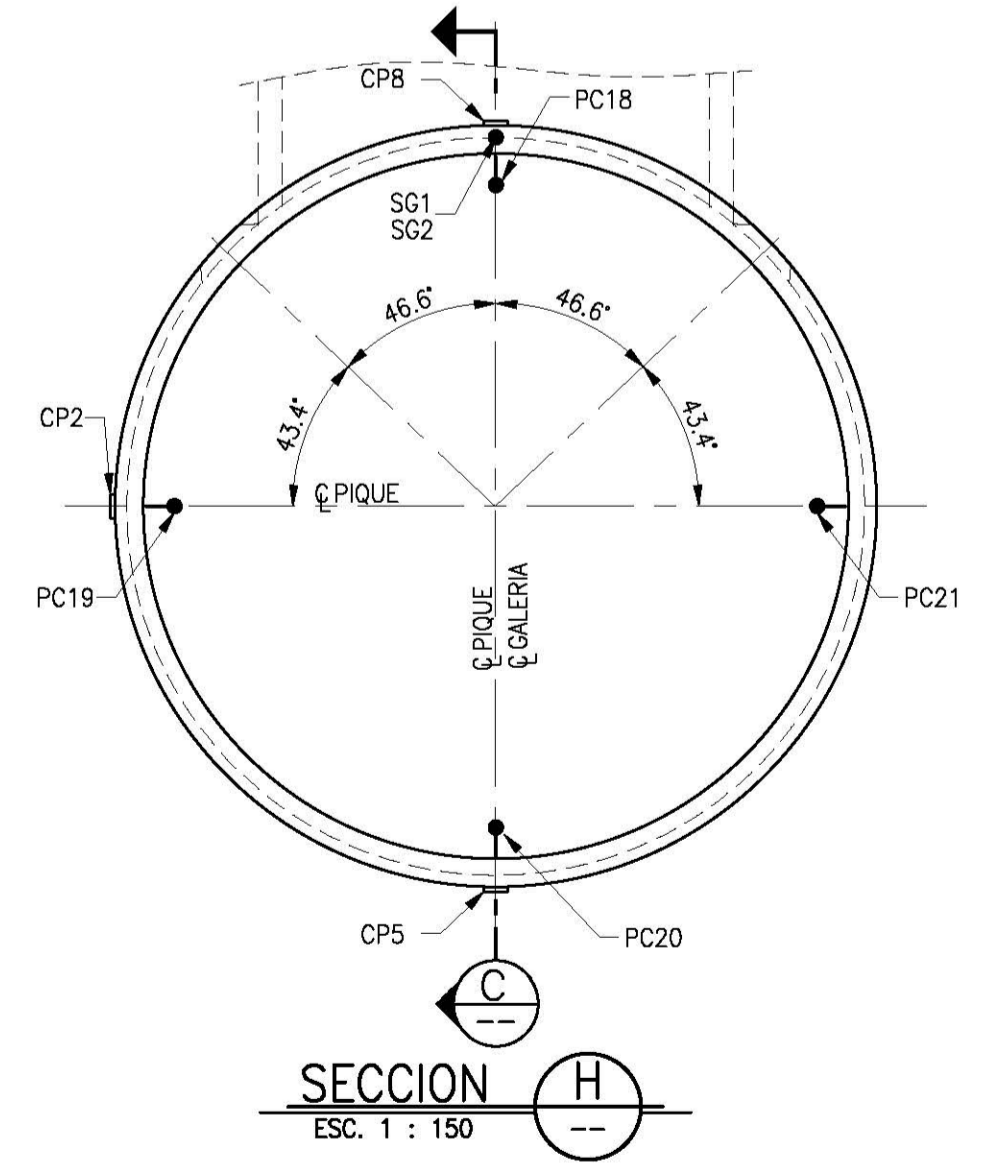
SECCION E  
ESC. 1 : 150



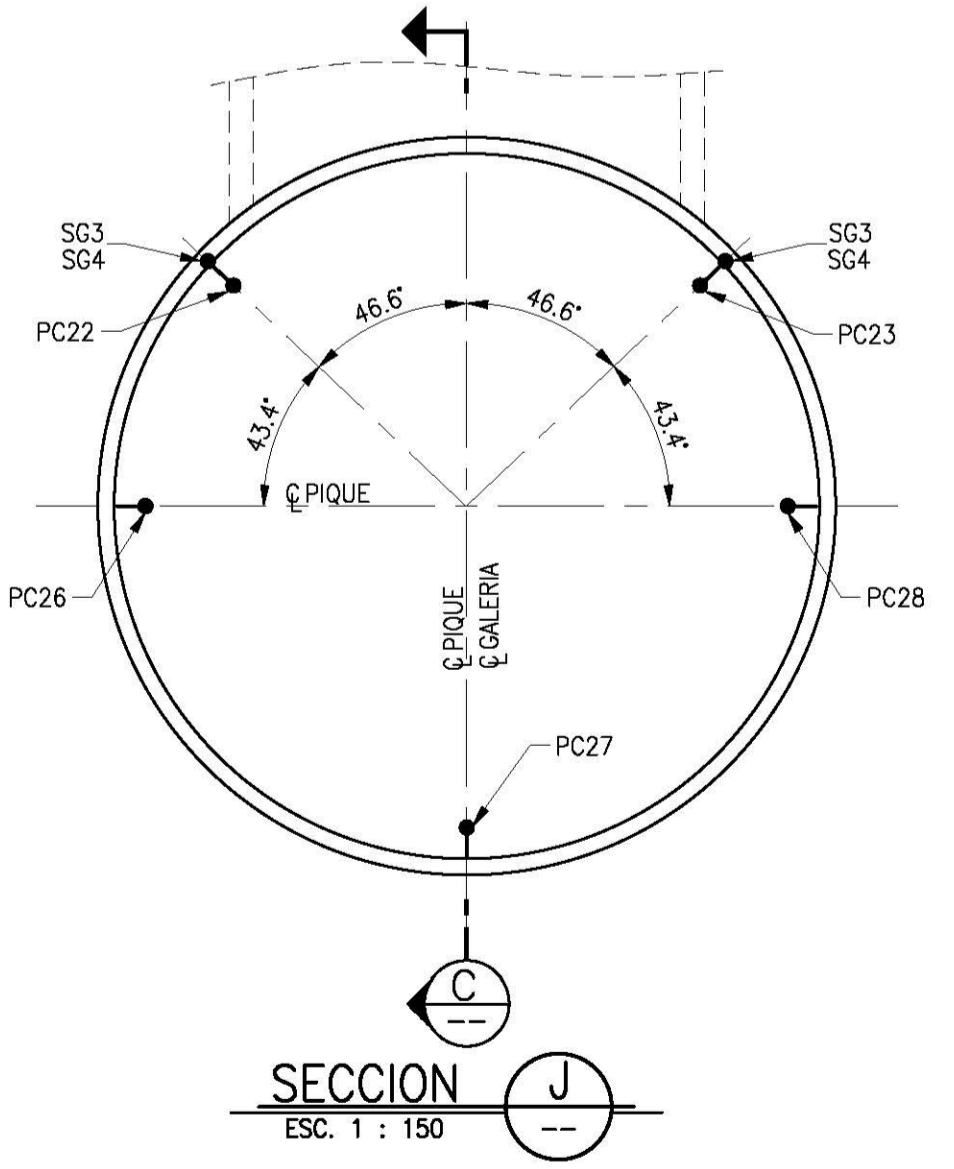
SECCION F  
ESC. 1 : 150



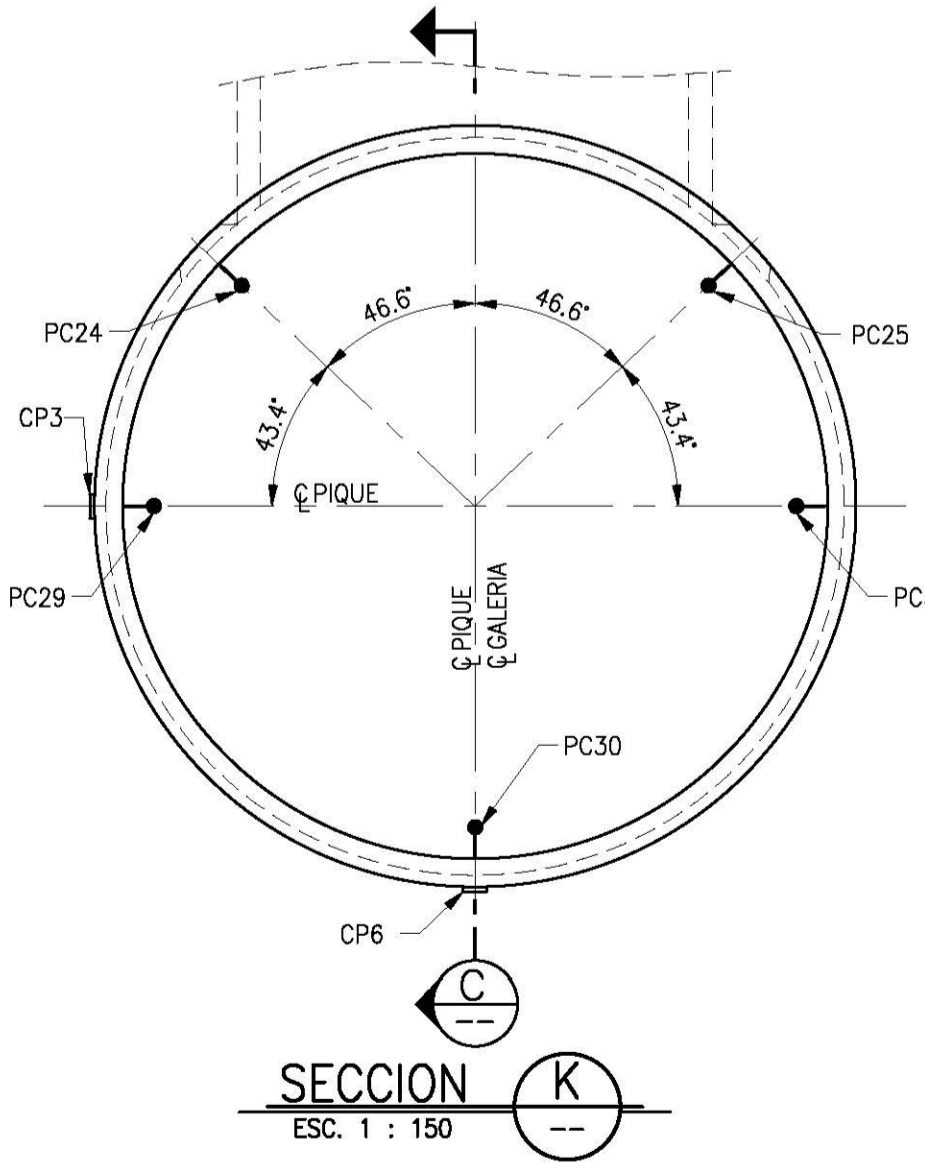
SECCION G  
ESC. 1 : 150



SECCION H  
ESC. 1 : 150



SECCION J  
ESC. 1 : 150



SECCION K  
ESC. 1 : 150

**SIMBOLOGIA**

PCE	PUNTOS DE CONTROL DE DEFORMACIONES EN EDIFICIOS (PRISMAS)
PC	PUNTOS DE CONTROL DE CONVERGENCIA
AS	PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO SUPERFICIALES
AE	PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO DE EDIFICACIONES
PS	PUNTO SUB-SUPERFICIAL
INC	INCLINOMETRO
SG	PUNTO DE CONTROL DE TENSIONES EN REVESTIMIENTO
CP	CELDA DE PRESION

- NOTAS:**
- 1.- VER NOTAS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-057-TU-801
  - 2.- UBICACION DE PUNTO DE MEDICION SERA EN EJE VERTICAL DE REFUERZO
  - 3.- VER DETALLE DE INSTRUMENTOS EN PLANO N° L3-ID-02-PLA-057-TU-803

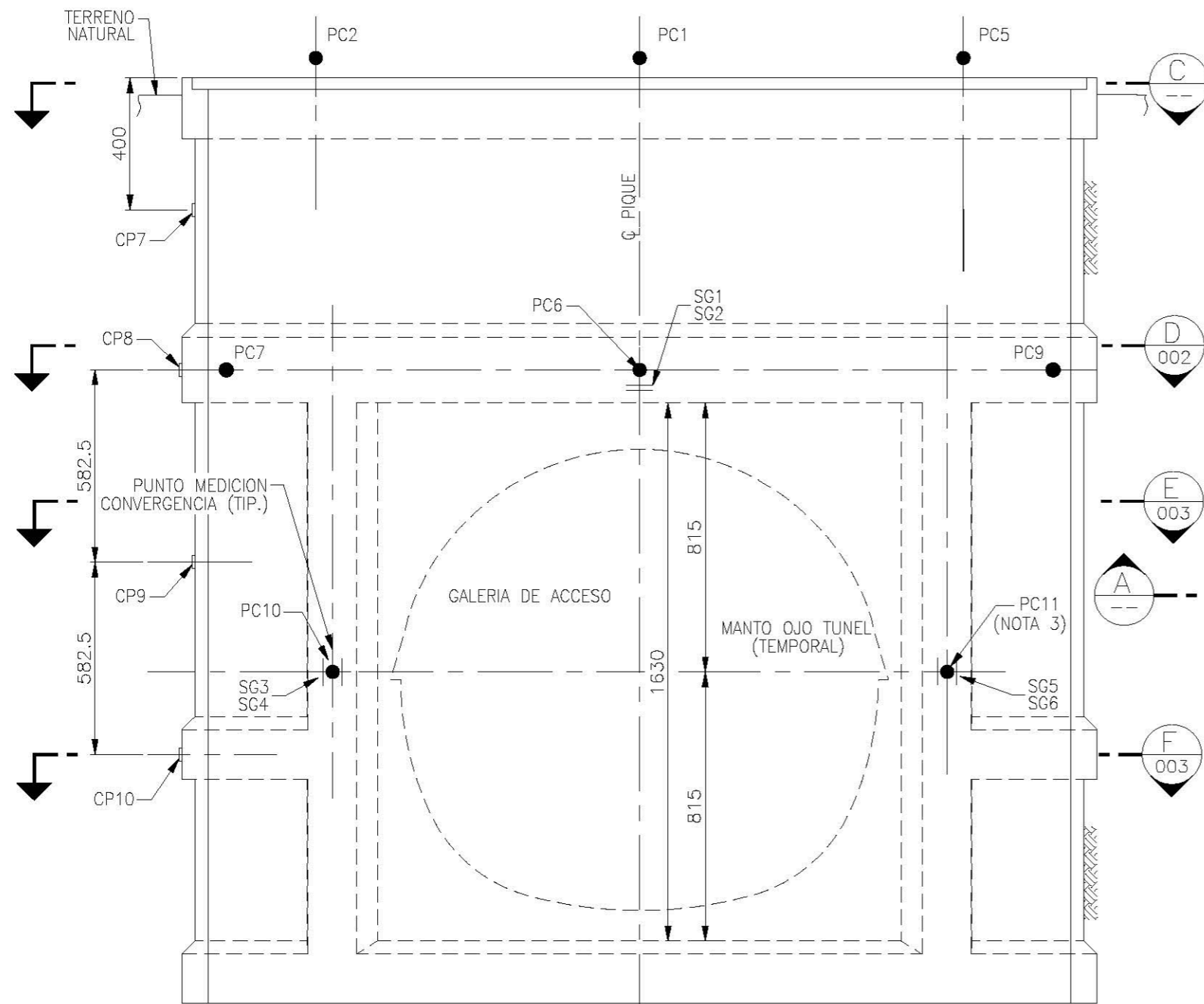
REFERENCIAS	PLANO N°	TITULO
L3-ID-02-PLA-057-TU-803		SECCIONES Y DETALLES
L3-ID-02-PLA-057-TU-801		SECCIONES
L3-ID-02-PLA-057-TU-801		PLANTA GENERAL Y SECCIONES

REV	FECHA	DESCRIPCION	PROY.	CALC.	REV.	ASE.	APR. J.E.	APR. D.P.
3	31.05.13	MODIFICACION POR CAMBIO DE TRAZADO	A.E.R.	J.C.P.	M.S.A.	N/A	J.P.R.	C.M.C.
2	03.04.13	ELIMINA INCLINOMETRO	C.V.M.	J.C.P.	C.P.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
1	11.01.13	EMITIDO PARA CONSTRUCCION	C.V.M.	V.V.	C.P.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
0	05.10.12	EMITIDO PARA CONSTRUCCION	C.V.M.	V.V.	C.P.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.
A	24.08.12	EMITIDO PARA COORDINACION INTERNA	C.V.M.	V.V.	C.P.C.	N/A	G.R.T.	C.M.C.

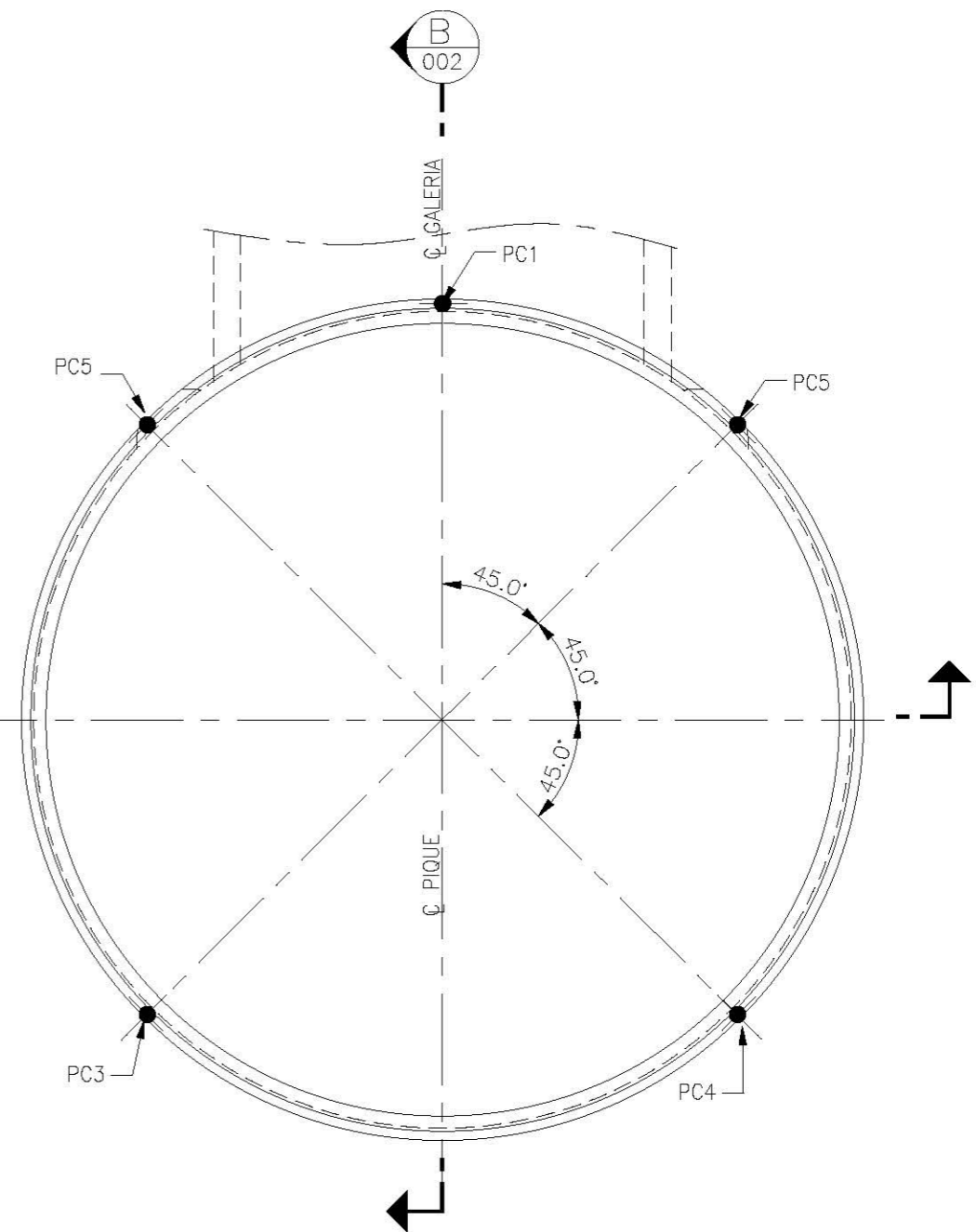
Christian Fernando Montes Castañeda  
2013.06.10  
181219-04W

METRO S.A.		
GERENCIA DE PROYECTO LINEA 3		
NOMBRE PROYECTISTA	FECHA	FIRMA
SUBGERENCIA OCCC Y ARQUITECTURA	FECHA	FIRMA
GERENCIA DE ING. Y TECNOLOGIA	FECHA	FIRMA
NOMBRE CONTRATISTA	FECHA	FIRMA

METRO S.A.			
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3			
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS			
Especialidad TUNELES	Contrato N° I12150	Plano N° L3-ID-02-PLA-057-TU-804-R03	
CONTENIDO			
INGENIERIA DE DETALLE DE OBRAS CIVILES			
PIQUE DE CONSTRUCCION EL CORTIJO			
SECCIONES			
SISTEMA DE MONITOREO - PIQUE			
ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REEMPLAZA A
INDICADAS	24.08.2012		



SECCION A  
ESC. 1 : 150



SECCION C  
ESC. 1 : 200

Alejandro Urquiza Cruz  
Firma digitalizada por Alejandro Urquiza Cruz  
Verificación de firma digitalizada por: CECILIA ESTRELLA PUGLIA DE SANCHEZ  
Calle Corrientes 1080, Ciudad de Buenos Aires  
Argentina, correo electrónico: alejandro.urquiza@metro.com.ar

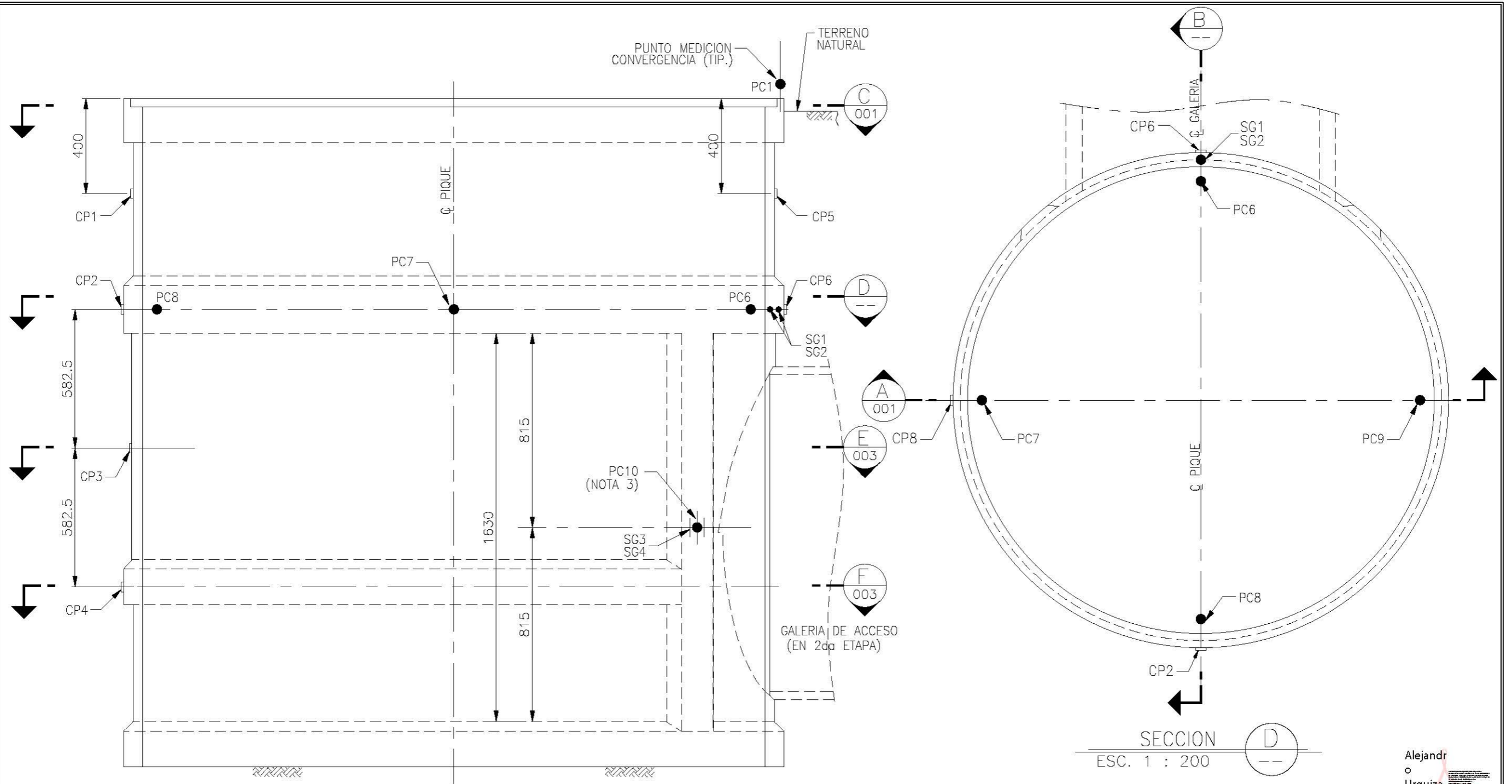
NOTAS:

- 1.- DIMENSIONES EN cm (S.I.C.)
- 2.- VER NOTAS EN PLANO L3-ID-02-PLA-206-TU-801
- 3.- UBICACION DE PUNTO DE MEDICION SERA EN EJE VERTICAL DE REFUERZO

SIMBOLOGIA

- PCE PUNTOS DE CONTROL DE DEFORMACIONES EN EDIFICIOS (PRISMAS)  
 PC PUNTOS DE CONTROL DE CONVERGENCIA  
 AS PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO SUPERFICIALES  
 AE PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO DE EDIFICACIONES  
 PS PUNTO SUB-SUPERFICIAL

		<b>METRO S.A.</b>	
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3			
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS			
Especialidad TUNELES	Contrato N° PL3-0703-01-12	ESQUEMA N° L3-ID-02-ESQ-206-TU-001	
CONTENIDO INGENIERIA DE DETALLE PIQUES Y GALERIAS - ETAPA B ESTACION PLAZA CHACABUCO PIQUE - SECCIONES - 1 DE 3 SISTEMA DE MONITOREO			
C.S.M.R.	R.T.A.	---	J.P.R.
PROY.	CALC.	REV.	APR. J.E.
ESCALA INDICADAS		FECHA 11.07.2013	REFERENCIA L3-ID-02-PLA-206-TU-804
			REV 0



SECCION B  
ESC. 1 : 150

SECCION D  
ESC. 1 : 200

Alejandro Urquiza Cruz

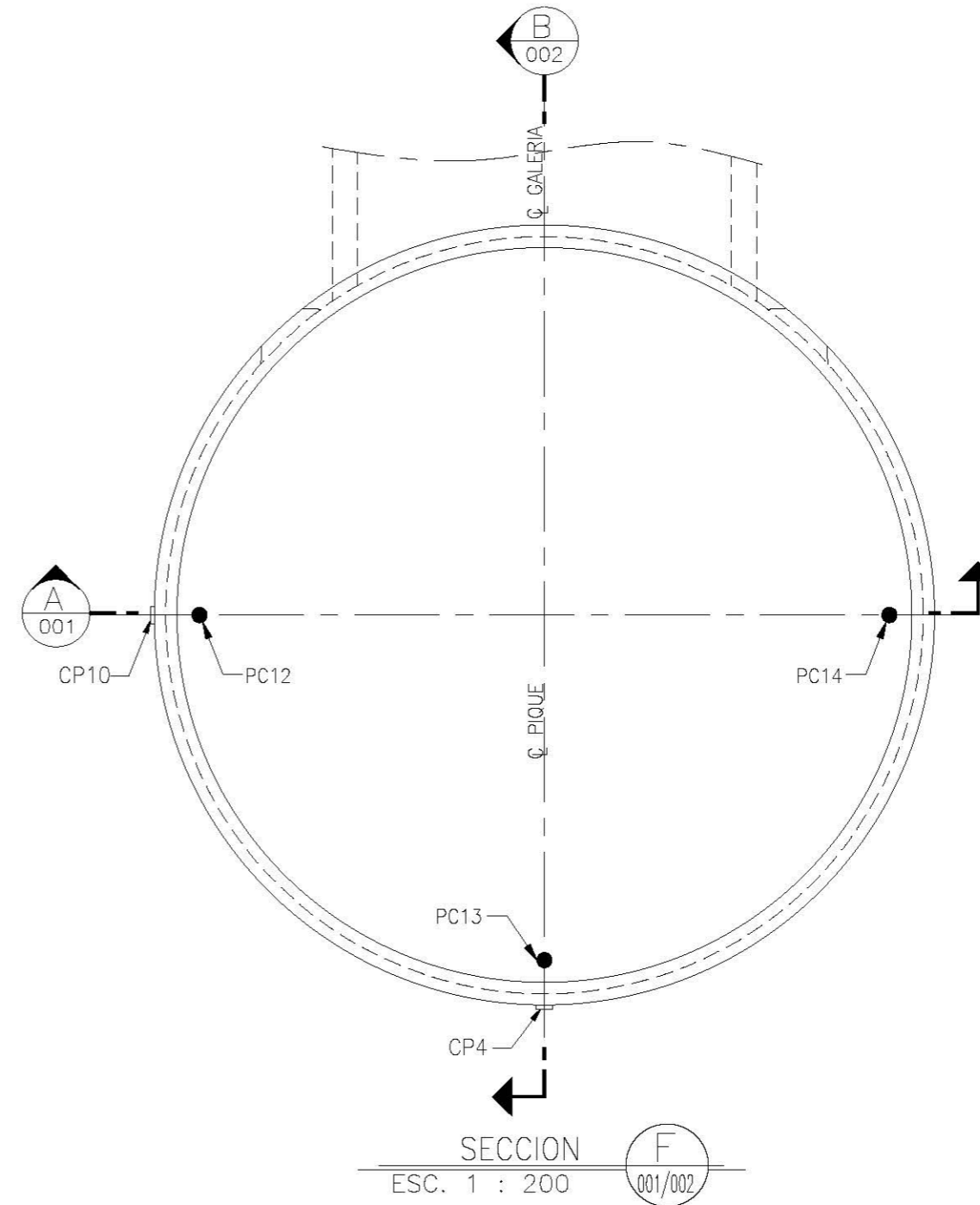
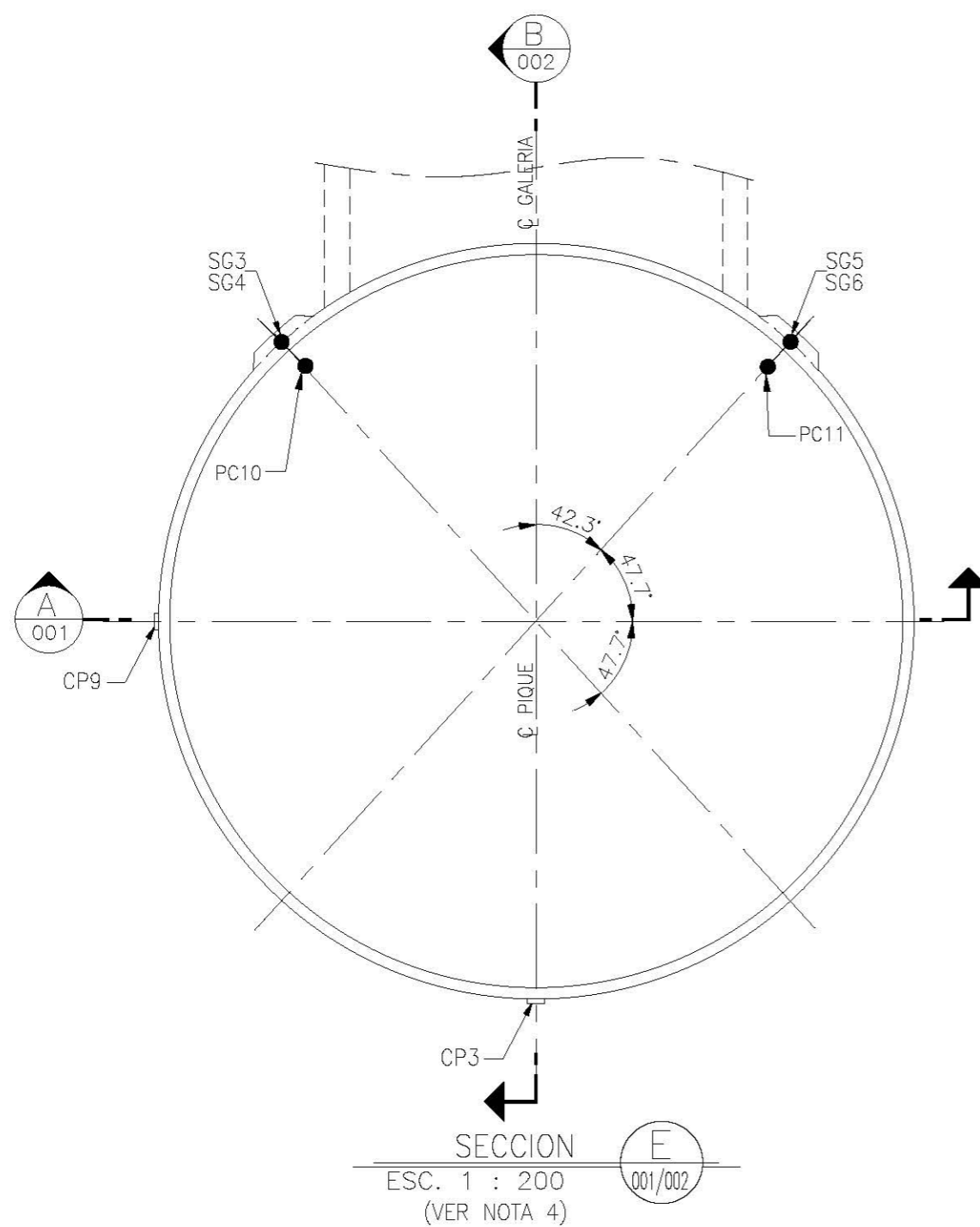
NOTAS:

- 1.- DIMENSIONES EN cm (S.I.C.)
- 2.- VER NOTAS EN PLANO L3-ID-02-PLA-206-TU-801
- 3.- UBICACION DE PUNTO DE MEDICION SERA EN EJE VERTICAL DE REFUERZO

SIMBOLOGIA

- |     |   |
|-----|---|
| PCE | PUNTOS DE CONTROL DE DEFORMACIONES EN EDIFICIOS (PRISMAS) |
| PC  | PUNTOS DE CONTROL DE CONVERGENCIA                         |
| AS  | PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO SUPERFICIALES            |
| AE  | PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO DE EDIFICACIONES         |
| PS  | PUNTO SUB-SUPERFICIAL                                     |

<b>METRO S.A.</b>							
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3							
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS							
Especialidad TUNELES	Contrato N° PL3-0703-01-12	ESQUEMA N° L3-ID-02-ESQ-206-TU-002					
CONTENIDO INGENIERIA DE DETALLE PIQUES Y GALERIAS - ETAPA B ESTACION PLAZA CHACABUCO PIQUE - SECCIONES - 2 DE 3 SISTEMA DE MONITOREO							
C.S.M.R.	R.T.A.	---	J.P.R.	ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REV
PROY.	CALC.	REV.	APR. J.E.	INDICADAS	11.07.2013	L3-ID-02-PLA-206-TU-804	0



Alejandro Urquiza Cruz

NOTAS:

- 1.- DIMENSIONES EN cm (S.I.C.)
- 2.- VER NOTAS EN PLANO L3-ID-02-PLA-206-TU-801
- 3.- UBICACION DE PUNTO DE MEDICION SERA EN EJE VERTICAL DE REFUERZO
- 4.- LA SECCION E DEBE SER UBICADA EN LA MITAD DE LA ALTURA DEL REFUERZO VERTICAL.

SIMBOLOGIA

- |     |   |
|-----|---|
| PCE | PUNTOS DE CONTROL DE DEFORMACIONES EN EDIFICIOS (PRISMAS) |
| PC  | PUNTOS DE CONTROL DE CONVERGENCIA                         |
| AS  | PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO SUPERFICIALES            |
| AE  | PUNTO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO DE EDIFICACIONES         |
| PS  | PUNTO SUB-SUPERFICIAL                                     |

		<b>METRO S.A.</b>					
INGENIERIA DE DETALLE - OBRAS CIVILES - PIQUES Y GALERIAS - LINEA 3							
CONSORCIO ARA WORLEYPARSONS - ARCADIS							
Especialidad TUNELES	Contrato N° PL3-0703-01-12	ESQUEMA N° L3-ID-02-ESQ-206-TU-003					
CONTENIDO INGENIERIA DE DETALLE PIQUES Y GALERIAS - ETAPA B ESTACION PLAZA CHACABUCO PIQUE - SECCIONES - 3 DE 3 SISTEMA DE MONITOREO							
C.S.M.R.	R.T.A.	---	J.P.R.	ESCALA	FECHA	REFERENCIA	REV
PROY.	CALC.	REV.	APR. J.E.	INDICADAS	11.07.2013	L3-ID-02-PLA-206-TU-804	0

## Anexo C: Lecturas obtenidas por las celdas de presión.

### C1. Pique El Cortijo.

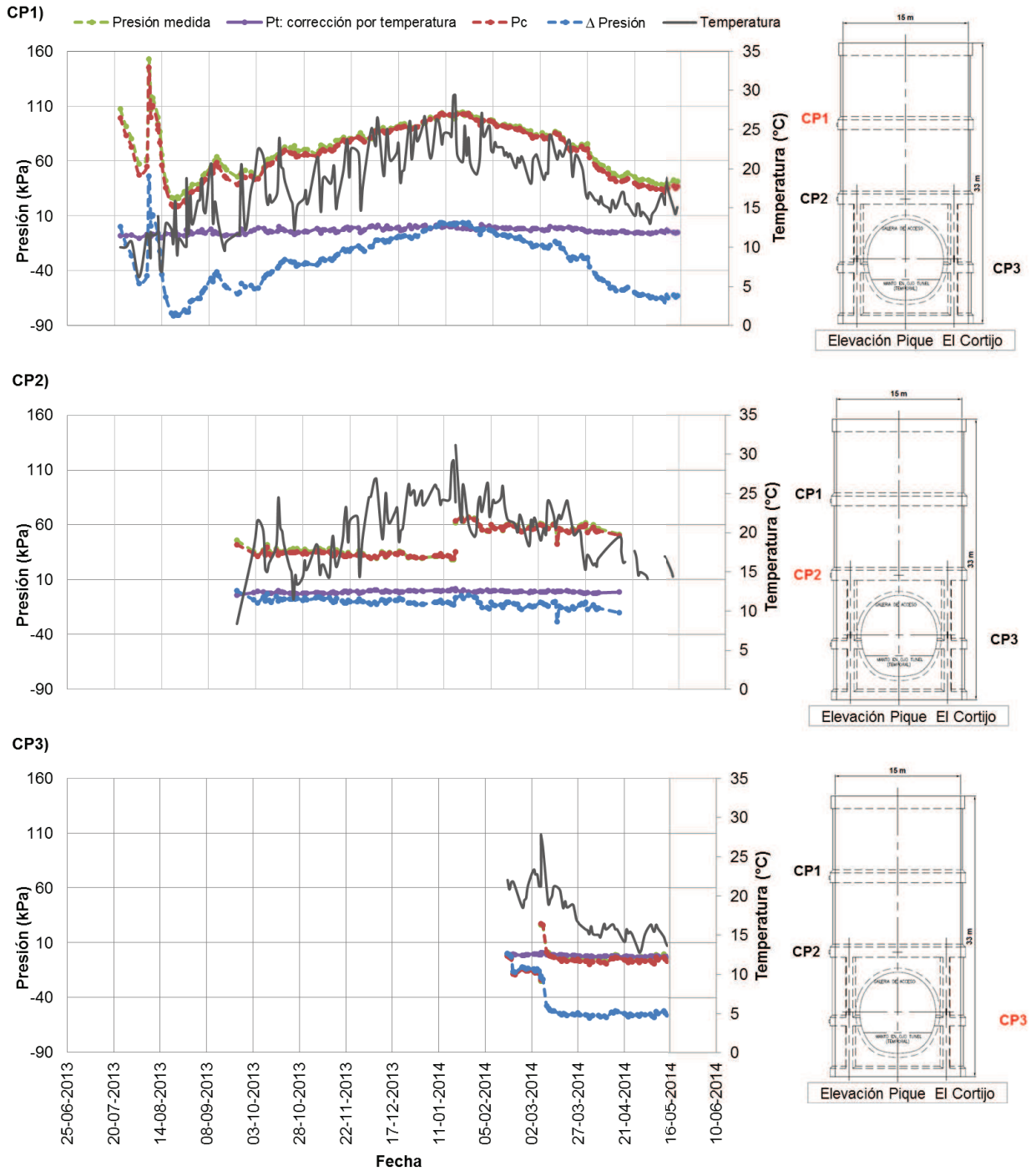


Figura 49: Presiones en Pique El Cortijo, costado norte.

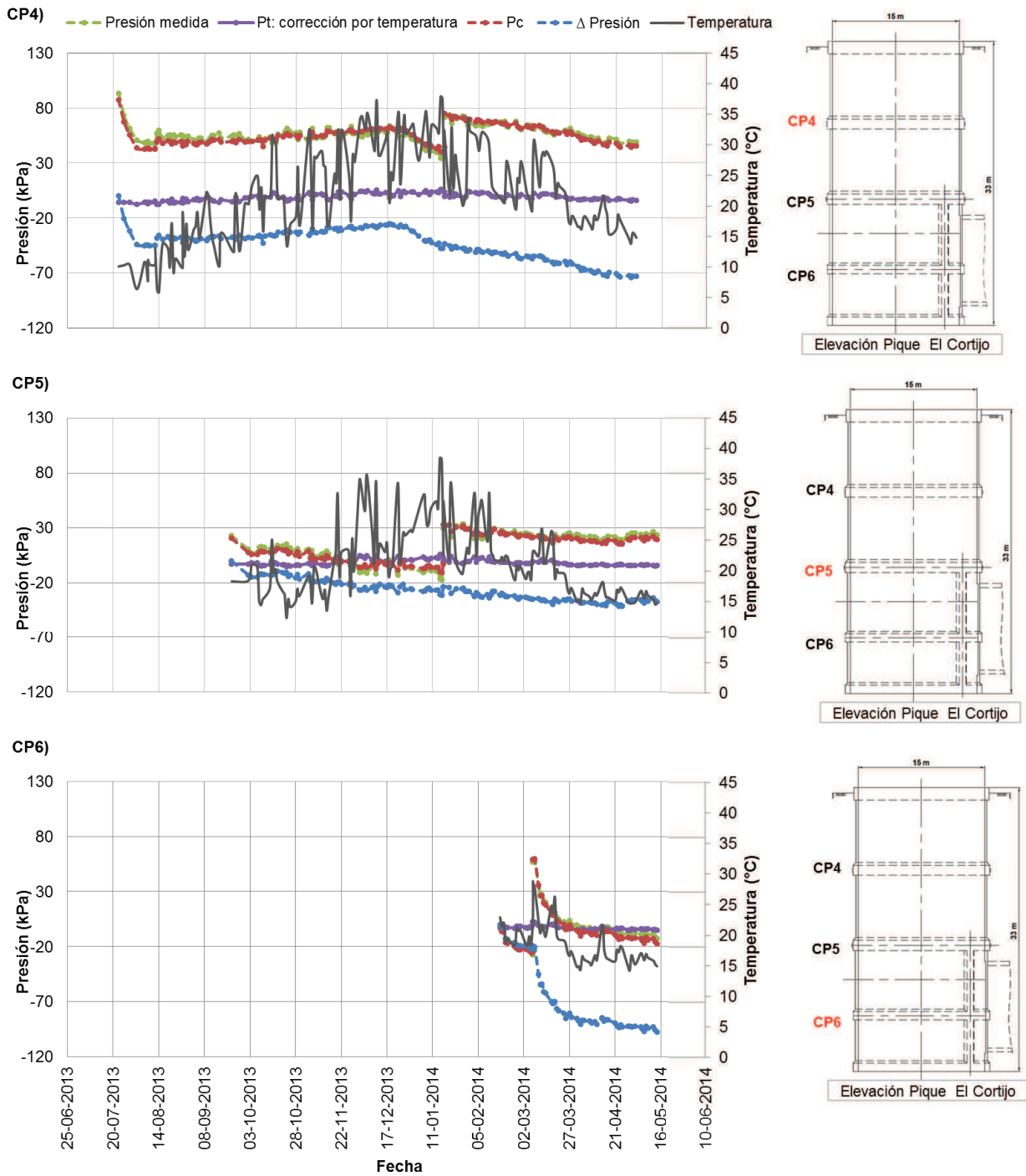
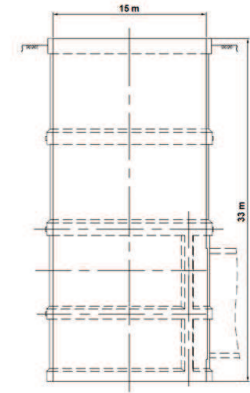
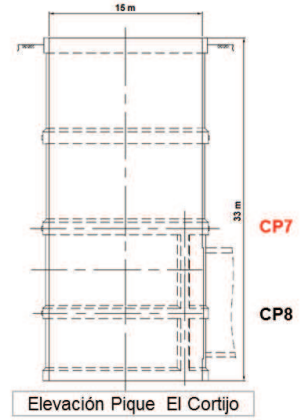
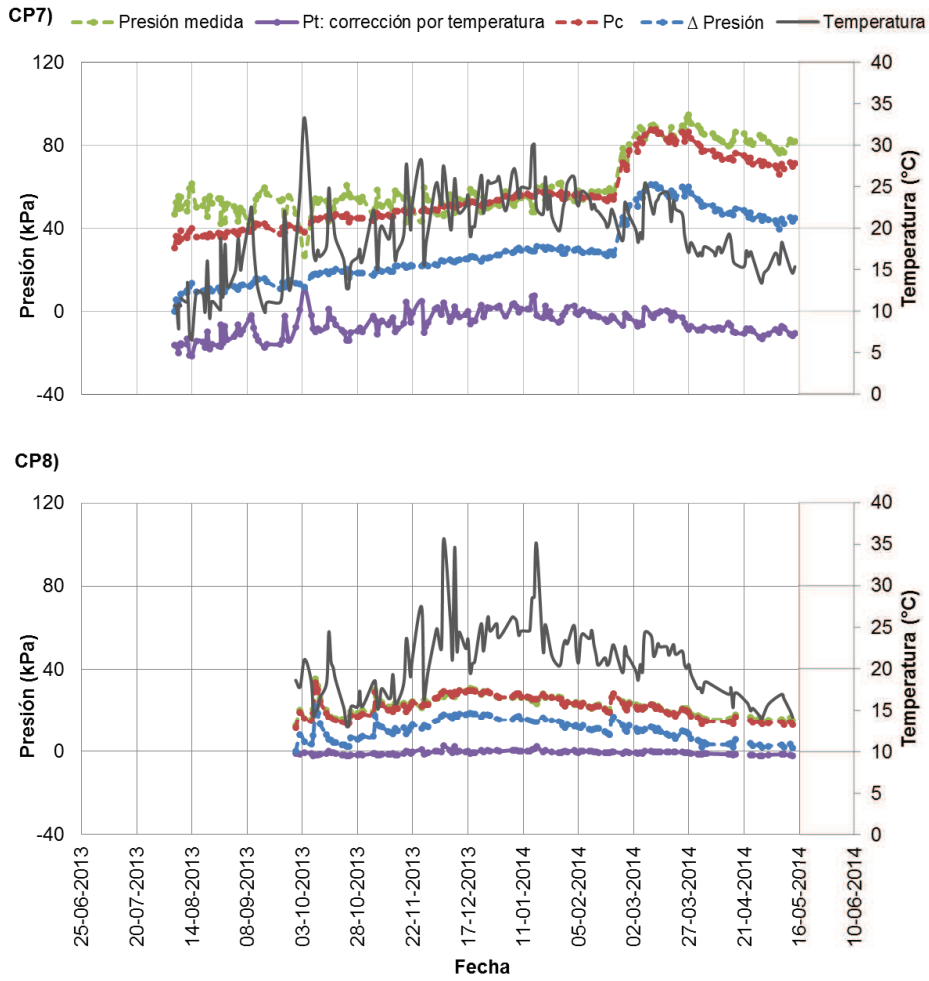
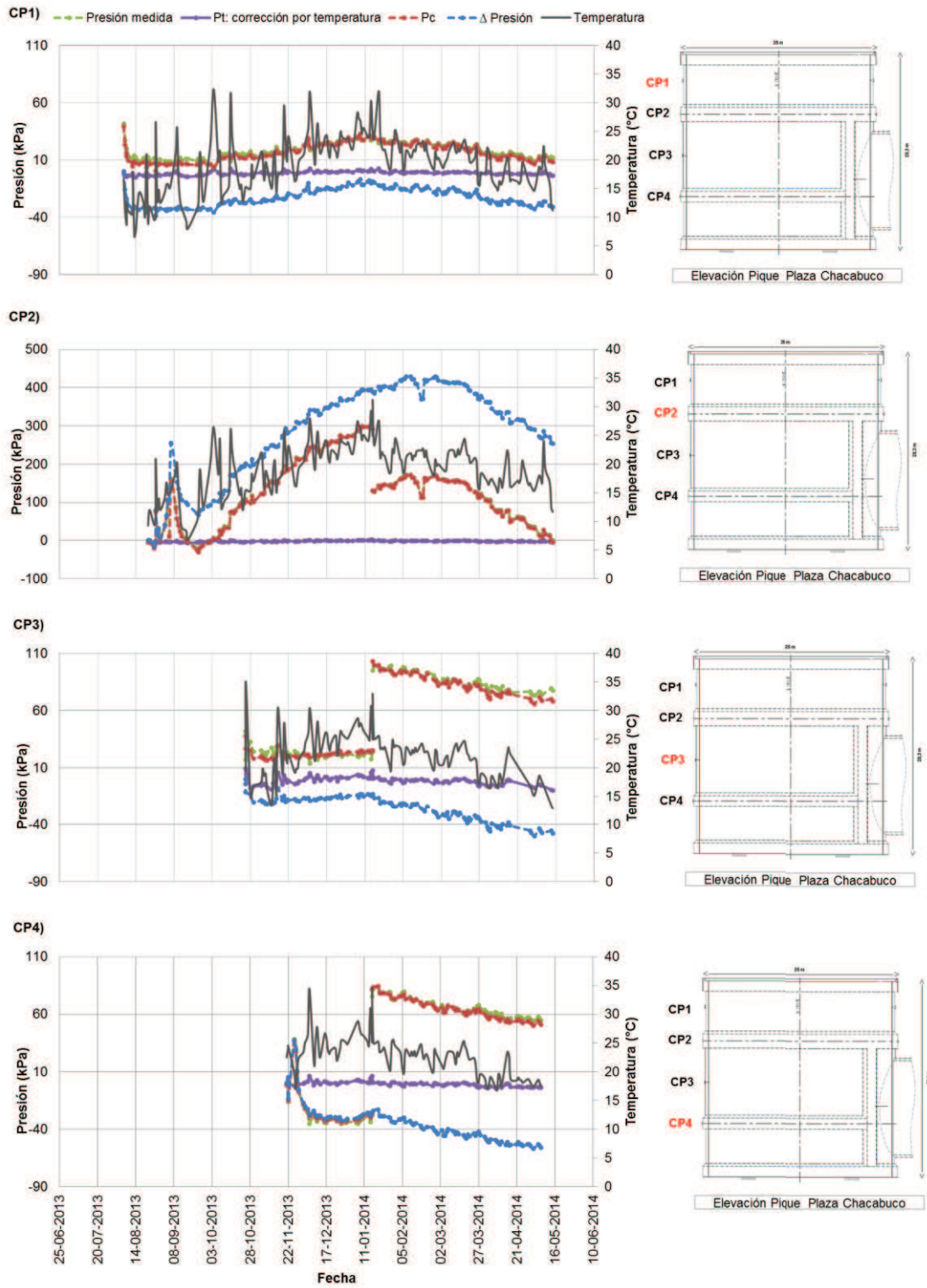


Figura 50: Presiones en Pique El Cortijo, costado poniente



**Figura 51:** Presiones en Pique El Cortijo, costado sur.

## D2. Pique Plaza Chacabuco.



**Figura 52:** Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado oriente.



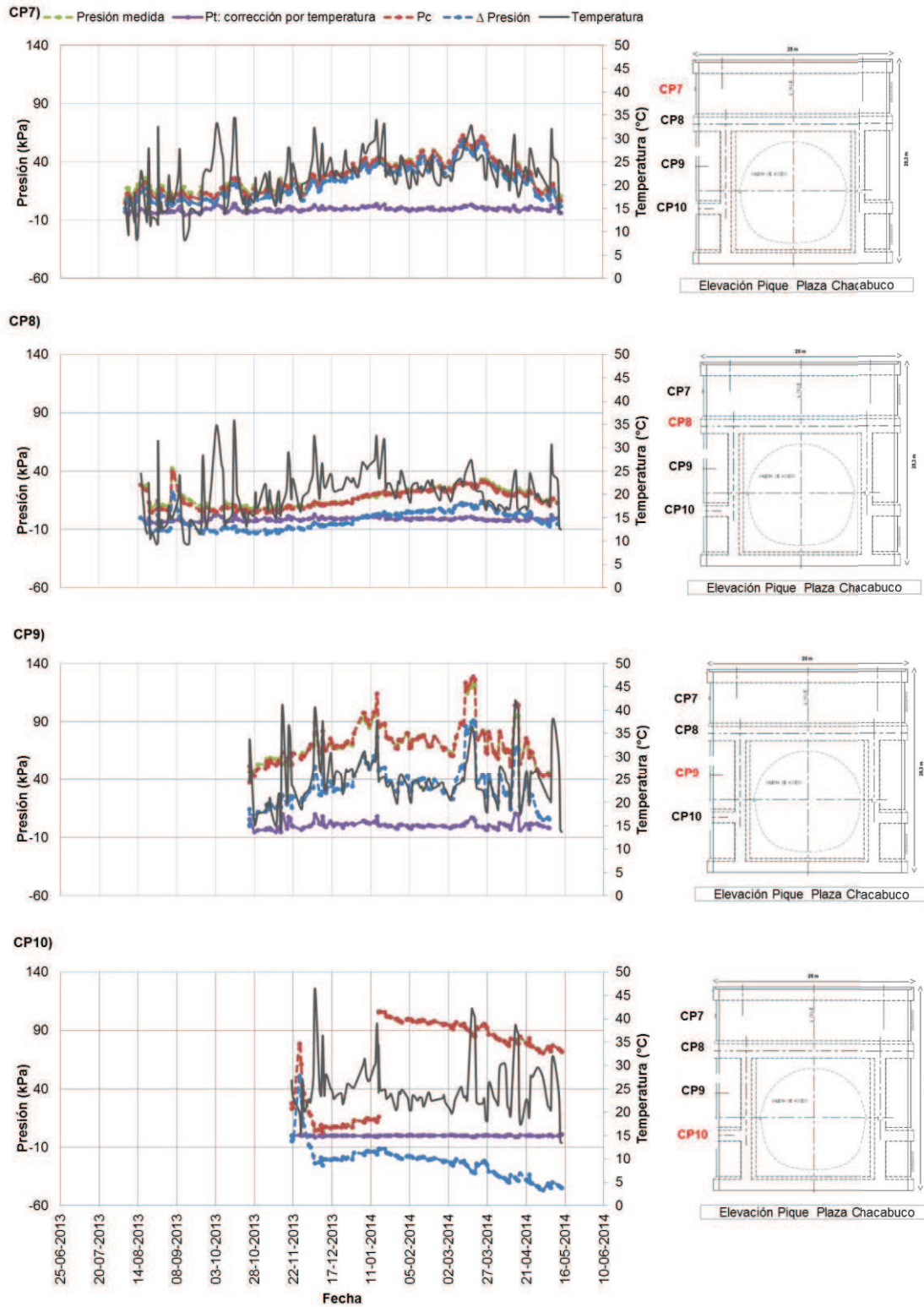


Figura 53: Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado sur.

CP5) — Presión medida — Pt: corrección por temperatura — Pc — Δ Presión — Temperatura

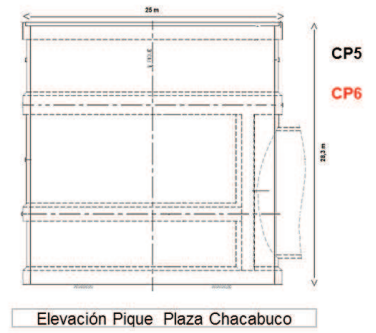
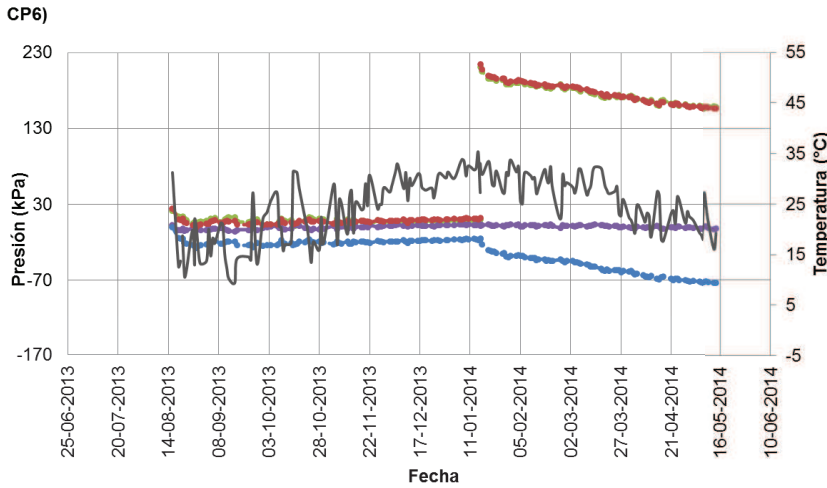
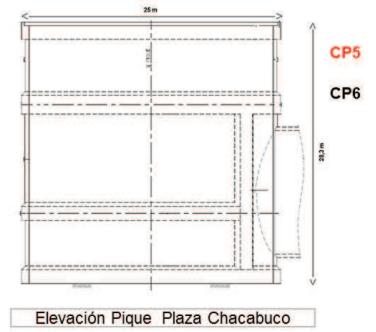
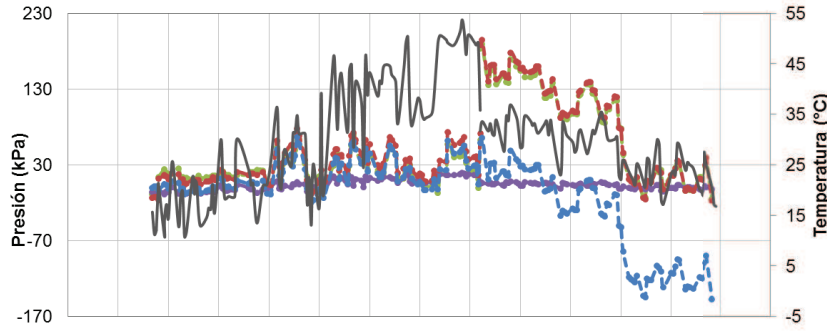


Figura 54: Presiones en Pique Plaza Chacabuco, costado poniente.