



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

ESTUDIO DE DEFORMACIONES DE TÚNELES METROPOLITANOS EN ZONA DE  
CRUCE POR CONSTRUCCIÓN DE TÚNEL INFERIOR. ESTUDIO BASADO EN LA  
EXPERIENCIA DE LA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE  
SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CRISTIAN ANDRÉS FIGUEROA CID

PROFESOR GUÍA:  
JUAN CARLOS POZO ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
EDGARDO MENAJEM GONZÁLEZ LIZAMA  
FELIPE AGUSTÍN OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: CRISTIAN ANDRÉS FIGUEROA CID  
FECHA: 18/03/2019  
PROF. GUÍA: JUAN CARLOS POZO ROJAS

## ESTUDIO DE DEFORMACIONES DE TÚNELES METROPOLITANOS EN ZONA DE CRUCE POR CONSTRUCCIÓN DE TÚNEL INFERIOR. ESTUDIO BASADO EN LA EXPERIENCIA DE LA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE SANTIAGO

Durante el año 2013 comenzó la construcción de la nueva Línea 3 del Metro de Santiago, inaugurada a principios del año 2019. Debido a la baja profundidad de los túneles existentes en la red, la construcción del nuevo túnel debió realizarse bajo los túneles existentes, lo cual hace imperioso el cuidado al excavar en zonas de cruce para no afectar la serviciabilidad de la línea superior.

Metro de Santiago llevó a cabo una instrumentación consistente en puntos en la superficie del suelo y sobre la losa los túneles existentes, monitoreando y analizando las subsidencias ocurridas por el avance de la excavación. Estas subsidencias fueron estimadas por el Consorcio ARA Worley Parsons - ARCADIS (encargado del diseño de ingeniería básica y de detalle) en la etapa de diseño del túnel, definiendo límites de serviciabilidad y colapso. Como resultado de ello, se obtuvo que en general las estimaciones del proyecto fueron superiores a las medidas en terreno.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia de los suelos y las profundidades y dimensiones de los túneles de la línea 3 en la producción de asentamientos en las líneas existentes, producto de la construcción del nuevo túnel inferior. Para esto, se realiza una revisión bibliográfica de la literatura existente, en especial sobre las teorías de deformaciones y leyes de asiento de los suelos por la construcción de túneles subterráneos. Además, se extrae toda la información de dimensiones de los túneles y profundidades de ellos a partir de los planos de diseño, junto con las propiedades de los suelos implicados.

Por otro lado, se trabaja con los registros de asentamientos en profundidad (sobre losa de línea existente) y en superficie para definir los perfiles de asentamiento. Analizadas las subsidencias, se buscan las correlaciones entre las propiedades de los túneles y los suelos que inciden en la ocurrencia de asentamientos. Finalmente, se analiza la aplicabilidad del Nuevo Modelo de Madrid sobre los suelos de Santiago y la construcción de la nueva línea 3, evaluando principalmente si los volúmenes de asiento obedecen a la ley propuesta por este modelo.

A partir de los resultados obtenidos se desprende que el Nuevo Modelo de Madrid funciona de buena manera sobre los suelos de Santiago. Además, se propone una relación entre propiedades de los túneles y anchos de asentamiento, con la cual es posible estimar asentamientos máximos. Esta debe seguir calibrándose con información de las próximas líneas a construir para analizar su aplicabilidad.

*Dedicado a quienes no tienen nuestras oportunidades,  
pero que día a día luchan por sus sueños.*

*"De repente, no era algo personal para mí. Pude imaginar cientos y cientos de chicos que vivían en el lado equivocado de la ciudad, chicos con ojos negros que se asustaban de su propia sombra.*

*Cientos de chicos que quizás observaban las puestas de sol y las estrellas y que deseaban con todas sus fuerzas algo mejor. Pude ver chicos parados bajo la luz de un farol porque eran malos, duros y odiaban el mundo, y era muy tarde para decirles que aún quedaban cosas buenas, y no te creerían si lo hicieras. Era un problema demasiado grande para ser algo personal. Debería haber algo de ayuda, alguien debería decírselos antes de que fuera demasiado tarde. Alguien debería contar la historia desde su punto de vista, y quizás la gente lo entendería y no serían tan rápidos para juzgar a un chico por su forma de vestir."*

*Rebeldes, Susan Hinton.*

# Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer al profesor Juan Carlos Pozo por darme la posibilidad y la confianza de trabajar con él en este proceso que ha sido de gran aprendizaje.

Gracias a mis padres por entregarme los valores y la libertad para tomar mis propias decisiones, apoyándome en cada paso que he dado. Gracias por entregarme las herramientas y las oportunidades para convertirme en el hombre que soy hoy. Gracias a mi hermana por enseñarme el camino para lograr mis metas y mis sueños. Joce, sin tí esto habría sido imposible.

Gracias a toda mi familia por su constante preocupación y apoyo. En especial gracias a mis Tíos Janeth y Javier y a mi primo por su cariño y su amor de toda la vida. Gracias Jemmy por dejarme vivir contigo estos años. Juan y Vale, gracias por su apoyo, sobre todo al principio de este largo camino. Tío Pepe, tía Gilda y primo Miguel, gracias por su cariño y por nuestros sábados de mil. Primo Vicente, gracias por tu buena onda y tu ayuda este trabajo.

Gracias a los Larrys por la amistad que formamos cuando entramos a la universidad. Gracias Negro, Fabi, Yechua, Mati, Lukas, Nico, Diego, Marcelo, Pancho y Pato por los momentos buenos y malos, por los días de estudio (?) en la biblioteca, por las changas, los carretes y las peras.

Gracias Nati por los buenos momentos viajando por el mundo con los cabros. Por tu preocupación constante y tu cariño.

Gracias Constanza por tu cariño y paciencia. Gracias por las conversaciones de los temas más complejos de la vida, y los no tanto. Gracias por las marchas, las tokatas, los cigarritos y los recre.

Gracias al equipo docente de topografía, donde pasé cuatro años de mi carrera. Isa, Jorge, Otu, Jaque, Consuelo, Catalina, Max, Ale, Celis, Mati, Álvaro. Y a mis padawan: Nacho, Nicole y Yoyi.

Gracias a mi gente del MECESAUNA con la que compartí 6 meses de almuerzos y sobremesas eternas. En especial al Lucho por la marginalidad compartida, a Javiera por enseñarme a amasar de pie y a Consuelo por apañar en el proyecto más hermoso que llevé a cabo en mi carrera. Gracias Omar y Mario por el apoyo a los estudiantes que no recibimos de otras partes.

Finalmente, gracias a mis amigos del Frente Popular por darme el último empujón que necesitaba para terminar mi carrera de la forma que quería y gracias por enseñarme de las cosas importantes.



# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.2.1	General . . . . .	2
1.2.2	Específicos . . . . .	2
1.3	Alcance . . . . .	3
1.4	Alcances de cada capítulo . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisión Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Modelo de Peck (1969) . . . . .	6
2.1.1	Ley de Asientos . . . . .	6
2.1.2	Determinación del parámetro $i$ . . . . .	8
2.2	Modelos de Sagaseta y Oteo . . . . .	9
2.2.1	Ley de Asientos . . . . .	9
2.2.2	Determinación del parámetro $i$ . . . . .	10
2.3	Modelo de Madrid . . . . .	11
2.3.1	Ley de Asientos . . . . .	11
2.3.2	Determinación del parámetro $i$ . . . . .	14
2.3.3	Asentamientos en profundidad . . . . .	15
2.4	Nuevo Modelo de Madrid (2010) . . . . .	17
2.4.1	Ley de Asientos . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Antecedentes Generales de la Construcción y Monitoreo de la Nueva Línea 3</b>	<b>20</b>
3.1	Proyecto Línea 3 . . . . .	21
3.1.1	Trazado . . . . .	21
3.1.2	Tipos de estaciones y túneles . . . . .	22
3.1.3	Excavación de piques, galerías y túneles . . . . .	27
3.2	Monitoreo Geotécnico . . . . .	28
3.3	Instrumentación . . . . .	29
3.3.1	Asentamientos en profundidad . . . . .	29
3.3.2	Asentamientos en superficie . . . . .	30
3.4	Unidad Geotécnica Grava de Santiago . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Perfiles Transversales de Asentamiento</b>	<b>34</b>
4.1	Asentamientos medidos en profundidad . . . . .	35
4.1.1	Estación Cal y Canto . . . . .	35
4.1.2	Estación Plaza de Armas . . . . .	36
4.1.3	Estación Universidad de Chile . . . . .	37

4.1.4	Estación Irarrázaval . . . . .	38
4.1.5	Estación Plaza Egaña . . . . .	40
4.2	Asentamientos medidos en superficie . . . . .	41
4.2.1	Estación Cal y Canto . . . . .	41
4.2.2	Estación Plaza de Armas . . . . .	42
4.2.3	Estación Universidad de Chile . . . . .	43
4.2.4	Estación Irarrázaval . . . . .	44
4.2.5	Estación Plaza Egaña . . . . .	44
4.3	Obtención de parámetros . . . . .	45
4.3.1	Punto de inflexión . . . . .	45
4.3.2	Volúmenes de asiento . . . . .	46
4.3.3	Resumen de Parámetros . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Magnitudes Físicas de Túneles y Suelos</b>	<b>48</b>
5.1	Planos Longitudinales . . . . .	49
5.2	Planos en Planta . . . . .	51
5.3	Planos Transversales Túneles Línea 3 . . . . .	54
5.4	Propiedades de los Suelos . . . . .	56
5.5	Resumen de Parámetros . . . . .	56
5.6	Correlación de Parámetros . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Aplicación de la Teoría de Deformaciones</b>	<b>62</b>
6.1	Obtención de alturas de niveles pliocénicos . . . . .	63
6.2	Análisis de registros en profundidad . . . . .	65
6.2.1	Volúmenes de asientos . . . . .	65
6.2.2	Relación asentamientos en profundidad y superficie . . . . .	68
6.3	Análisis de registros en superficie . . . . .	69
6.3.1	Volúmenes de asientos . . . . .	69
<b>7</b>	<b>Comentarios y Conclusiones</b>	<b>72</b>
7.1	Comentarios y Conclusiones . . . . .	73
7.1.1	Perfiles de asentamiento . . . . .	73
7.1.2	Influencia de las dimensiones . . . . .	73
7.1.3	Verificación del Nuevo Modelo de Madrid . . . . .	74
7.2	Recomendaciones para futuras líneas investigativas . . . . .	76
<b>Bibliografía</b>		<b>79</b>
<b>8</b>	<b>Anexos</b>	<b>80</b>
8.1	Anexo A: Perfiles Estratigráficos . . . . .	80
8.2	Anexo B: Informe de Mecánica de Suelos . . . . .	86
8.2.1	Sectorización del trazado . . . . .	86
8.2.2	Parámetros Geotécnicos . . . . .	86
8.2.3	Ubicación de Calicatas . . . . .	88
8.2.4	Descripción de las estratigrafías . . . . .	89
Tramo 1	. . . . .	89
Tramo 2	. . . . .	91
Tramo 3	. . . . .	92

8.3 Anexo C: Informe Deformaciones Estimadas . . . . . 94

# Índice de tablas

2.1	Leyes de Variación $V_s$ , Modelo de Madrid . . . . .	17
3.1	Dimensiones promedio túneles estación . . . . .	28
3.2	Dimensiones promedio túneles estación . . . . .	28
3.3	Dimensiones promedio piques . . . . .	28
3.4	Dimensiones promedio galerías . . . . .	28
4.1	Comparación Cal y Canto . . . . .	36
4.2	Comparación Plaza de Armas . . . . .	37
4.3	Comparación Universidad de Chile . . . . .	38
4.4	Comparación Irarrázaval . . . . .	39
4.5	Comparación Plaza Egaña . . . . .	41
4.6	Valores de $i$ . . . . .	46
4.7	Valores de $V_s$ a partir de registros en profundidad . . . . .	46
4.8	Valores de $V_s$ a partir de registros en superficie . . . . .	46
4.9	Resumen de parámetros . . . . .	47
5.1	Propiedades Geotécnicas Gravas de Santiago . . . . .	57
5.2	Propiedades Geotécnicas Finos del Norte y Cono de Deyección . . . . .	57
5.3	Resumen propiedades físicas . . . . .	58
5.4	Diámetros equivalentes . . . . .	58
5.5	Resumen propiedades físicas . . . . .	58
6.1	Espesores $H_p$ . . . . .	65
6.2	ECM entre ajuste y leyes de asiento . . . . .	67
6.3	$V_s$ real y ajustes, caso en profundidad . . . . .	67
6.4	$V_s$ real y ajustes . . . . .	68
6.5	ECM entre ajuste y leyes de asiento . . . . .	71
6.6	$V_s$ real y ajustes, caso en superficie . . . . .	71
8.1	Propiedades Geotécnicas Gravas de Santiago . . . . .	87
8.2	Propiedades Geotécnicas Finos del Norte y Cono de Deyección . . . . .	87
8.3	Ubicación de Calicatas . . . . .	88

# Índice de figuras

2.1	Ajuste de curva de asentamientos (Peck, 1969) . . . . .	6
2.2	Punto de Inflexión en Perfil Transversal (Díez, 2010) . . . . .	7
2.3	Relación entre $i$ , $D$ y $H$ para diferentes condiciones de terreno. (Peck, 1969) . . . . .	8
2.4	Método semiempírico de Sagaseta y Oteo (1974) . . . . .	10
2.5	Perfil esquemático Modelo de Madrid (Oteo et al, 1999) . . . . .	11
2.6	Volumen de asientos en ampliación del Metro de Madrid (Oteo, 2001) . . . . .	12
2.7	Estimación del asiento máximo. Modelo de Madrid (Oteo et al, 1999) . . . . .	13
2.8	Ley semiempírica de asientos superficiales longitudinales sobre el eje del túnel (Oteo, 2001) . . . . .	13
2.9	Definición semiempírica de la cubeta de Atterwell (Oteo, 2001) . . . . .	14
2.10	Localización del punto de inflexión (Oteo, 2001) . . . . .	15
2.11	Determinación de asientos en el interior del terreno a partir de los superficiales (Oteo, 2003) . . . . .	16
2.12	Leyes de variación de $V_s$ en función de $H_p/D$ según criterios analizados (Díez, 2010)	18
2.13	Extensión del Modelo de Madrid (Díez, 2011) . . . . .	18
2.14	Validación del modelo, valores de $V_s$ en las obras ejecutadas en el período 2007 - 2011 (Díez, 2014) . . . . .	19
3.1	Trazado línea 3 y 6 del Metro de Santiago (Montes y Pozo, 2015). . . . .	21
3.2	Carta geológica de Santiago y trazado línea 3 (Montes y Pozo, 2015). . . . .	22
3.3	Estación grande (Montes y Pozo, 2015). . . . .	23
3.4	Estación mediana (Montes y Pozo, 2015). . . . .	24
3.5	Estación pequeña (Montes y Pozo, 2015). . . . .	24
3.6	Túnel estación tipo "Herradura" para gravas (Montes y Pozo, 2015). . . . .	25
3.7	Túnel interestación tipo "Herradura" para gravas (Montes y Pozo, 2015). . . . .	25
3.8	Túnel estación para suelos finos (Montes y Pozo, 2015). . . . .	26
3.9	Túnel interestación para suelos finos (Montes y Pozo, 2015). . . . .	26
3.10	Secuencia constructiva doble side drift, estaciones grandes (Montes y Pozo, 2015). . . . .	27
3.11	Secuencia constructiva single side drift, estaciones medianas (Montes y Pozo, 2015). . . . .	27
3.12	Disposición de electroniveles a nivel de losa de línea 1 (Torres, 2014). . . . .	30
3.13	Perfil transversal, punto de control de asentamiento superficial (Montes y Pozo, 2015). . . . .	31
3.14	Fotografía en planta, punto de control de asentamiento superficial (Montes y Pozo, 2015). . . . .	31
3.15	Punto de control superficial (Montes y Pozo, 2015). . . . .	32
3.16	Detalle punto de control superficial (Montes y Pozo, 2015). . . . .	32
4.1	Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 2 . . . . .	35
4.2	Curva de desplazamientos verticales, Estación Cal y Canto . . . . .	35

4.3	Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 5 . . . . .	36
4.4	Curva de desplazamientos verticales, Estación Plaza de Armas . . . . .	37
4.5	Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 1 . . . . .	37
4.6	Curva de desplazamientos verticales, Estación Universidad de Chile . . . . .	38
4.7	Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 5 . . . . .	39
4.8	Curva de desplazamientos verticales, Estación Irarrázaval . . . . .	39
4.9	Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 4 . . . . .	40
4.10	Curva de desplazamientos verticales, Estación Plaza Egaña . . . . .	40
4.11	Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Cal y Canto . . . . .	42
4.12	Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Plaza de Armas . . . . .	43
4.13	Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Universidad de Chile . . . . .	43
4.14	Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Irarrázaval . . . . .	44
4.15	Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Plaza Egaña . . . . .	45
5.1	Perfil estación Cal y Canto . . . . .	49
5.2	Perfil estación Plaza de Armas . . . . .	49
5.3	Perfil estación Universidad de Chile . . . . .	50
5.4	Perfil estación Irarrázaval . . . . .	50
5.5	Perfil estación Plaza Egaña . . . . .	51
5.6	Planta estación Cal y Canto . . . . .	51
5.7	Planta estación Plaza de Armas . . . . .	52
5.8	Planta estación Universidad de Chile . . . . .	52
5.9	Planta estación Irarrázaval . . . . .	53
5.10	Planta estación Plaza Egaña . . . . .	53
5.11	Sección transversal estación Cal y Canto . . . . .	54
5.12	Sección transversal Plaza de Armas . . . . .	54
5.13	Sección transversal estación Universidad de Chile . . . . .	55
5.14	Sección transversal estación Irarrázaval . . . . .	55
5.15	Sección transversal estación Plaza Egaña . . . . .	56
5.16	Esquema general de la disposición de los túneles en zonas de cruce de líneas. . . . .	58
5.17	Parámetro $i$ respecto a la profundidad del túnel . . . . .	59
5.18	Parámetro $i$ respecto a la profundidad de suelos rígidos . . . . .	60
5.19	Gráfico $i/b_2$ vs. $\delta_{max}/D_1$ . . . . .	61
5.20	Gráfico $i/b_2$ vs. $\delta_{max}/D_1$ . . . . .	61
6.1	Nivel de la clave del túnel inferior, estación Cal y Canto . . . . .	63
6.2	Nivel de la clave del túnel inferior, estación Plaza de Armas . . . . .	63
6.3	Nivel de la clave del túnel inferior, estación Universidad de Chile . . . . .	64
6.4	Nivel de la clave del túnel inferior, estación Irarrázaval . . . . .	64
6.5	Nivel de la clave del túnel inferior, estación Plaza Egaña . . . . .	65
6.6	Variación de volumen de asientos (en profundidad) en función de $H_p/D_2$ . . . . .	66
6.7	Ley de asientos obtenida (en profundidad) en función de $H_p/D_2$ , contrastada con ley propuesta por Díez (2010) . . . . .	66
6.8	Ley de asientos obtenida (en profundidad) en función de $H_p/D_2$ , contrastada con criterio de recubrimiento total, Díez (2010) . . . . .	67
6.9	Ley de asientos (en profundidad) y envolventes propuestas por Díez (2010) . . . . .	68
6.10	Variación de volumen de asientos (en superficie) en función de $H_p/D_2$ . . . . .	69

6.11	Ley de asientos obtenida (en superficie) en función de $H_p/D_2$ , contrastada con ley propuesta por Díez (2010) . . . . .	70
6.12	Ley de asientos obtenida (en superficie) en función de $H_p/D_2$ , contrastada con criterio de recubrimiento total, Díez (2010) . . . . .	70
6.13	Ley de asientos (en superficie) y envolventes propuestas por Díez (2010) . . . . .	71
7.1	Propuesta de disminución de envolvente máxima y mínima en el tramo central . . . . .	76
8.1	Estratigrafía Estación Cal y Canto . . . . .	81
8.2	Estratigrafía Estación Plaza de Armas . . . . .	82
8.3	Estratigrafía Estación Universidad de Chile . . . . .	83
8.4	Estratigrafía Estación Irarrázaval . . . . .	84
8.5	Estratigrafía Estación Plaza Egaña . . . . .	85
8.6	Efecto de Excavación de Túnel . . . . .	94
8.7	Vista en planta cruce estación Cal y Canto . . . . .	95
8.8	Corte transversal cruce Cal y Canto . . . . .	95
8.9	Distribución de asentamientos cruce Cal y Canto . . . . .	95
8.10	Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Cal y Canto . . . . .	96
8.11	Vista en planta cruce estación Plaza de Armas . . . . .	96
8.12	Corte transversal cruce Plaza de Armas . . . . .	97
8.13	Distribución de asentamientos cruce Plaza de Armas . . . . .	97
8.14	Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Plaza de Armas . . . . .	97
8.15	Vista en planta cruce estación Universidad de Chile . . . . .	98
8.16	Corte transversal cruce Universidad de Chile . . . . .	98
8.17	Distribución de asentamientos cruce Universidad de Chile . . . . .	99
8.18	Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Universidad de Chile . . . . .	99
8.19	Vista en planta cruce estación Irarrázaval . . . . .	100
8.20	Corte transversal cruce Irarrázaval . . . . .	100
8.21	Distribución de asentamientos cruce Irarrázaval . . . . .	101
8.22	Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Irarrázaval . . . . .	101
8.23	Vista en planta cruce estación Plaza Egaña . . . . .	101
8.24	Corte transversal cruce Plaza Egaña . . . . .	102
8.25	Distribución de asentamientos cruce Plaza Egaña . . . . .	102
8.26	Asentamiento esperado y rango de variación cruce Plaza Egaña . . . . .	102

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El constante desarrollo y progreso de una ciudad como Santiago sugiere la creación de planes de contingencia frente al aumento de la población en ella y su necesidad para transportarse diariamente. Es así como en el año 1969 comenzó la construcción de la Línea 1 del Metro de Santiago, entrando en operación el año 1975.

Al día de hoy la red del Metro de Santiago se extiende por una longitud de 140[km], con siete líneas en operación: 1, 2, 3, 4, 4A, 5 y 6. La línea 3, inaugurada en enero del año 2019, tiene una longitud de 22[km] con 18 estaciones, y une las comunas de Conchalí, Independencia, Santiago, Ñuñoa y La Reina.

Entre las particularidades de la nueva Línea 3 se pueden encontrar:

- Optimizaciones al NATM (New Austrian Tunneling Method), método de construcción de túneles típicamente utilizado por Metro de Santiago.
- Incorporaciones de nuevas tecnologías, como la alimentación eléctrica vía aérea (Catenaria), puertas de andén y trenes UTO (Unattended Train Operation)
- Conexiones con todas las líneas existentes de la red.

Este último ítem corresponde a un aspecto a considerar a la hora de diseñar el nuevo túnel, el cual debido a la baja profundidad de los túneles existentes, debe construirse por debajo de ellos. Lo anterior constituye un potencial problema, debido a que la excavación del nuevo túnel provoca asentamientos en las líneas existentes, y por consecuencia, en los rieles por los cuales circula el tren. Así, el diseño final del túnel debe considerar que la excavación de éste bajo una línea existente no provoque el colapso ni afecte la serviciabilidad de dicha red. Es por ello que se desarrollan modelamientos en softwares que consideran todas las variables que teóricamente inciden en las deformaciones, así como también se lleva un monitoreo de éstas a medida que se excava el nuevo túnel.

El consorcio ARA Worley Parsons - Arcadis (AWPA) se encargó de la ingeniería básica y de detalles del diseño de la línea 3 del Metro de Santiago. Para ello generó diversos tipos de estudios,



entre los cuales se encuentran:

- **Mecánica de Suelos**
  - Detalle de los ensayos realizados en terreno, incluyendo ubicación de calicatas, prospecciones y ensayos realizados.
  - Descripción de los perfiles estratigráficos y parámetros de los suelos para gravas de Santiago y suelos finos.
- **Análisis de Confiabilidad de Excavaciones**
  - Estudio generado en el cruce de Estación Universidad de Chile con el objetivo de evaluar el riesgo por excavación.
  - Análisis probabilísticos mediante simulación de Monte Carlo.
- **Estimación de Asentamientos**
  - Descripción del tipo de análisis (en 2D o 3D) a realizar en cada cruce, a modo de estimar asentamientos máximos.
  - Entrega los asentamientos máximos esperados para cada cruce, considerando rangos para cada uno de ellos.

Por otro lado, el consorcio AWPA diseñó un sistema de monitoreo en las zonas de cruce de línea, para así evaluar constantemente el asentamiento sobre el eje de las líneas superiores, desplazamiento de muros y distorsión angular. Así, estos datos pueden contrastarse con las estimaciones mencionadas anteriormente para analizar sus diferencias.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

El objetivo principal de la investigación corresponde a estudiar la relación que existe entre las deformaciones de un túnel debido a la construcción de uno inferior, en los puntos de cruce entre ellos, y las propiedades y características de ambos túneles y del suelo.

### **1.2.2. Específicos**

Dentro de los objetivos específicos del estudio, se consideran los siguientes:

- Recopilación e interpretación de modelos estimativos de deformaciones.
- Recopilación de información sobre el diseño y construcción de túneles existentes y nuevos.
- Análisis de datos de monitoreo de asentamientos de las líneas existentes.
- Determinación del comportamiento de las deformaciones ante variaciones de diámetros equivalentes, profundidades y propiedades del suelo.

- Análisis de la aplicabilidad de teorías existentes sobre subsidencia por construcción de túneles.

### **1.3. Alcance**

Para esta investigación se analizarán los datos obtenidos del monitoreo realizado en las zonas de intersección de líneas. Así, las zonas de análisis corresponden a los siguientes cruces:

- Estación Cal y Canto, intersección líneas 2 y 3.
- Estación Plaza de Armas, intersección líneas 5 y 3.
- Estación Universidad de Chile, intersección líneas 1 y 3.
- Estación Irrazábal, intersección líneas 5 y 3.
- Estación Plaza Egaña, intersección líneas 4 y 3.

Para Estas zonas de intersección se analizarán los asentamientos obtenidos, para ser relacionados con las siguientes variables:

- Propiedades del suelo.
- Área y diámetro equivalente de los túneles.
- Profundidad de los túneles.
- Distancia libre entre túneles.

### **1.4. Alcances de cada capítulo**

#### **Introducción**

Se presenta la motivación de la investigación de acuerdo al contexto actual del transporte en Santiago. Además, se mencionan los objetivos generales y específicos del estudio y el alcance que éste tiene. Finalmente, se detalla la estructura general de este informe.

#### **Revisión Bibliográfica**

Se revisa la bibliografía existente que permitirá el análisis de los datos disponibles para esta investigación. En particular se analizan teorías de deformación de los suelos por efecto de la excavación de los túneles.

#### **Antecedentes Generales de la Construcción y Monitoreo de la Nueva Línea 3**

Se hace una descripción general del proyecto de construcción de la línea 3 y de la instrumentación y monitoreo realizados.

## **Perfiles Transversales de Asentamiento**

Se trabaja con los registros de asentamiento de los suelos para con ello construir los perfiles que permitirán obtener los parámetros principales para evaluar la aplicación de las teorías de subsidencia en los suelos de Santiago, bajo los métodos constructivos utilizados por Metro.

## **Magnitudes Físicas de Túneles y Suelos**

Se extraen las dimensiones de los túneles y las profundidades de ellos a través de los planos y monografías disponibles. Además, se muestran los principales parámetros de los suelos. Finalmente, se estudia la dependencia de las subsidencias bajo variaciones de los parámetros obtenidos.

## **Aplicación de la Teoría de Deformaciones**

De acuerdo a los parámetros obtenidos, se evalúa la aplicación de la teoría del Nuevo Método de Madrid (Díez, 2010) bajo las condiciones de los túneles y los suelos de Santiago.

## **Conclusiones y Comentarios**

En base al trabajo realizado, se presentan las conclusiones del estudio y recomendaciones para futuras líneas de investigación.

# Capítulo 2

## Revisión Bibliográfica

En este capítulo se realiza una revisión del material bibliográfico relacionado con el tema de estudio, el cuál se utilizará para analizar la información entregada por el consorcio AWPA sobre el monitoreo de los asentamientos de las líneas existentes del Metro de Santiago, producto de la construcción de la línea 3.

Se presentan cuatro teorías de deformaciones, en las cuales se analizan los movimientos verticales debido a la excavación de túneles, junto a la determinación de parámetros importantes como el ancho de asentamiento y los volúmenes de asientos de acuerdo a diferentes autores. Las tres primeras teorías constituyen la base de la línea investigativa llevada por la cuarta de ellas (Nuevo Modelo de Madrid), la cual a su vez corresponde a la principal teoría utilizada en este estudio.

## 2.1. Modelo de Peck (1969)

### 2.1.1. Ley de Asientos

La hipótesis fundamental del Método de Peck (1969) consiste en la aproximación de la curva de asentamientos transversales de un túnel mediante un ajuste con forma de campana de Gauss invertida (figura 2.1)

Este método ha sido aceptado ampliamente en la práctica, y ha sido reconocido como un método empírico utilizado extensivamente en la evaluación de asentamientos de la superficie del suelo (Maras-Dragojevic, 2012). Además, los estudios producto de la construcción de las líneas del Metro de Madrid llevados a cabo por Oteo (2001) y Díez (2010) contemplan como base la determinación de los perfiles de asentamiento de acuerdo a este modelo, obteniendo curvas que representan de buena forma los asentamientos medidos en terreno.

Si bien Peck basó su estudio empírico en 25 casos de galerías excavadas en suelos cohesivos y granulares, autores posteriores como Atterwell y Farmer (1974), Hanya (1977), Atterwell (1978), McCaul (1978) y Dulaksa (1982), lo han desarrollado y extendido a suelos finos.

El ajuste de esta curva se define mediante parámetros característicos que determinarán posteriormente los volúmenes de suelo perdidos debido a la excavación del túnel. Así, la curva de asentamientos queda definida mediante la relación:

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

- $S_v(x)$ : Asentamiento a distancia  $x$  del eje del túnel
- $S_{vmax}$ : Asentamiento máximo
- $x$ : Distancia horizontal desde el eje del túnel
- $i$ : Ancho de asentamiento. Abscisa del punto de inflexión de la curva

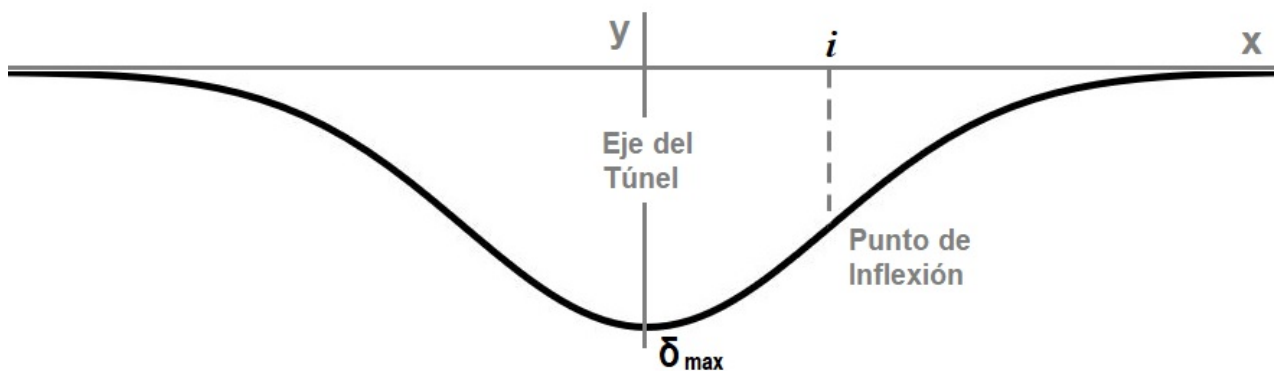


Figura 2.1: Ajuste de curva de asentamientos (Peck, 1969)

Donde el parámetro  $i$  corresponde a la coordenada del eje de las abscisas del punto de inflexión de la curva, por lo tanto, determina el punto de mayor inclinación del terreno, y en el cual se pueden provocar los mayores daños a estructuras. Además, este punto limita las zonas de tracción y compresión del suelo (figura 2.2)

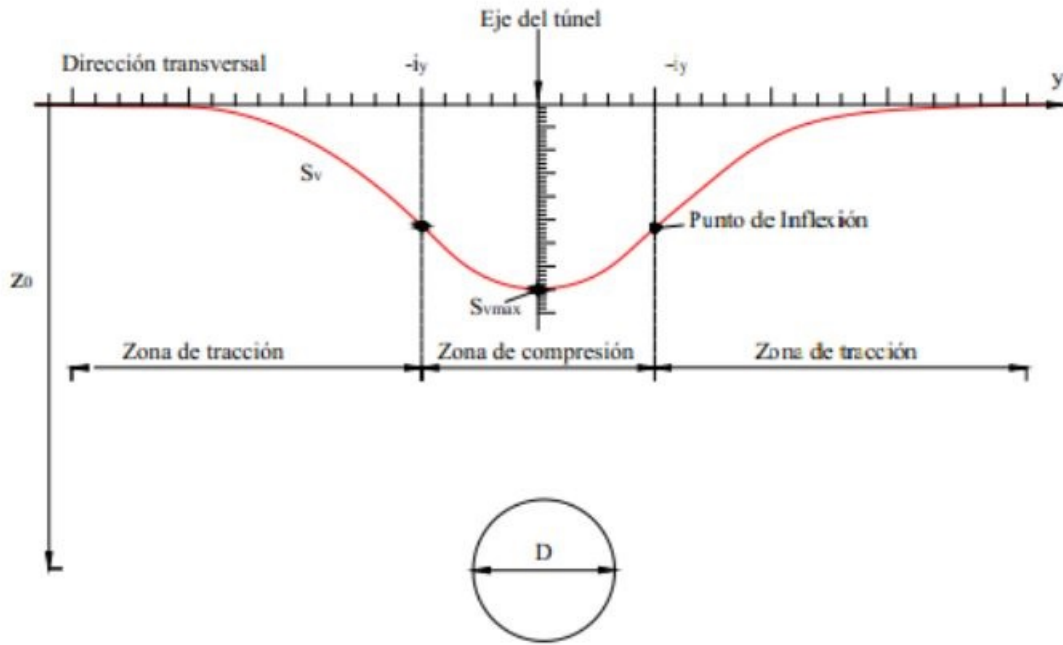


Figura 2.2: Punto de Inflexión en Perfil Transversal (Díez, 2010)

Como resultado de la integración de la ecuación 2.1 se obtiene el volumen de asientos por metro longitudinal de excavación:

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{vmax} \quad (2.2)$$

Donde:

- $V_s$ : Volumen de asientos por metro longitudinal
- $i$ : Ancho de asentamiento
- $S_{vmax}$ : Asentamiento máximo

Finalmente, es posible calcular el volumen de asientos porcentual como fracción respecto al área teórica del túnel, mediante la relación:

$$V_l = \frac{V_s}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

Donde:

- $V_l$ : Volumen de asientos porcentual
- $V_s$ : Volumen de asientos por metro longitudinal
- $D$ : Diámetro equivalente del túnel

Debido a que las formas de los túneles varían en su diseño, en general se trabaja con diámetros equivalentes, los cuales dependen del área transversal de los túneles según la relación:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2.4)$$

Donde “A” representa el área teórica de excavación del túnel.

Finalmente, el modelo de Peck ha demostrado ser eficiente para valores de  $V_s$  menores al 8 % debido a que para mayores porcentajes de volumen de asiento se produce una rotura o socavón y el movimiento superficial es casi uniforme sobre el túnel, por lo que el modelo de campana de Gauss ya no aplica (Oteo et al, 2001).

### 2.1.2. Determinación del parámetro $i$

Peck (1969) propuso una relación entre el ancho de asentamiento  $i$ , el diámetro del túnel excavado  $D$  y la profundidad  $H$  de éste. Así, desarrolla 3 curvas en función de las características del terreno (figura 2.3).

- Rocas, arcillas duras y arenas sobre nivel freático
- Arcillas blandas a medias
- Arenas bajo nivel freático

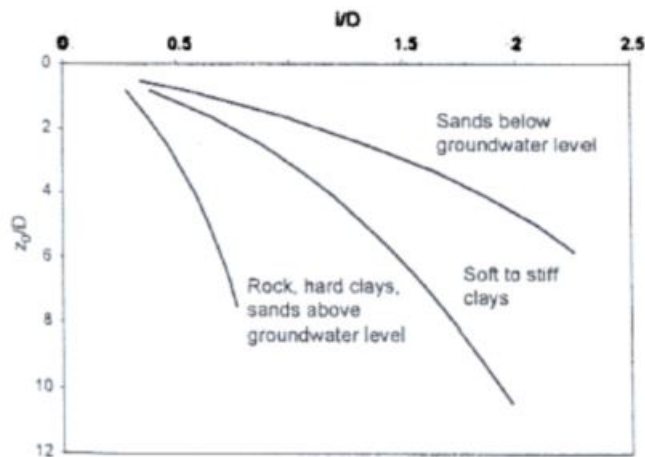


Figura 2.3: Relación entre  $i$ ,  $D$  y  $H$  para diferentes condiciones de terreno. (Peck, 1969)

## 2.2. Modelos de Sagaseta y Oteo

### 2.2.1. Ley de Asientos

Sagaseta (1987) propone la ley de asientos en base a estudios elásticos mediante la relación:

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{H}\right)^2} \quad (2.5)$$

Donde:

- $S_v(x)$ : Asentamiento a distancia “x” del eje del túnel
- $S_{vmax}$ : Asentamiento máximo
- $x$ : Distancia horizontal desde el eje del túnel
- $H$ : Profundidad del túnel

La relación anterior se ajusta de mejor manera a la realidad cuando existe mayor cantidad de elementos rígidos sobre la superficie, según las observaciones de Oteo y Rodríguez (2001).

Así, Sagaseta, Moya y Oteo (1981) desarrollaron el método semiempírico para la estimación de los asentamientos en base a una serie de parámetros (figura 2.4), mediante la relación:

$$S_{vmax}(x) = \frac{\gamma D^2}{E} (0,85 - \nu) \quad (2.6)$$

Donde:

- $S_{vmax}$ : Asentamiento máximo
- $\gamma$ : Densidad aparente del terreno
- $D$ : Diámetro equivalente del túnel
- $E$ : Módulo de deformación en descompresión
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson

Sin embargo, la relación anterior tiene una limitación ya que no considera el proceso constructivo del túnel. Por lo tanto, se agregó un nuevo parámetro denominado “Factor de Subsistencia”.

$$S_{vmax}(x) = \frac{\gamma D^2}{E} (0,85 - \nu) \cdot \psi \quad (2.7)$$

El parámetro  $\psi$  fue introducido por Sagaseta, Moya y Oteo (1981) para considerar la influencia del proceso constructivo, el tipo de terreno, la acción del sostenimiento y la velocidad de avance de excavación.



### 2.2.2. Determinación del parámetro $i$

Sagaseta y Oteo (1974) desarrollaron una expresión para la obtención del parámetro de ancho de asentamiento en base a análisis dimensional y elementos finitos:

$$\frac{i}{D} = \eta(0,52 \frac{H}{D} - 0,21) \quad (2.8)$$

Donde:

- $i$ : Ancho de asentamiento
- $D$ : Diámetro equivalente del túnel
- $H$ : Profundidad del túnel
- $\eta$ : Parámetro que varía entre 0,75 y 1,25

## M.E.F. + TEOREMA $\pi$ + OBSERVACIÓN

### MÉTODO SEMIEMPÍRICO

(S.T.S.M.)

$$v_s \approx (0.2 - 4)\% \text{ de } \Omega$$

$$\delta_{s,MÁX} = \frac{\gamma D^2}{E} (0.85 - \nu) \cdot \psi$$

MÓDULO  
DEFORM. SUELO

MÓDULO POISSON  
SUELO

$$\frac{i}{D} = (0.52 \frac{H}{D} - 0.21) \cdot \eta$$

(OTEO Y SAGASETA)

$\Psi$  = INFLUENCIA PROCESO CONSTRUCTIVO : 0,1-1,0

$\eta$  = 0,75-1,25

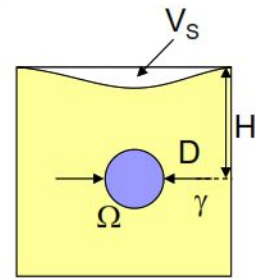


Figura 2.4: Método semiempírico de Sagaseta y Oteo (1974)

## 2.3. Modelo de Madrid

### 2.3.1. Ley de Asientos

El modelo de Madrid (Oteo et al, 2001) consiste en un modelo semiempírico contrastado con medidas reales registradas en las excavaciones del sistema de metro de esa ciudad. Este modelo se basa en un perfil de terreno bicapa (figura 2.5), con un terreno flojo superficial y uno inferior de mayor resistencia. Con esto se buscó representar de manera más fiel los problemas reales a la hora de estimar los asentamientos del terreno por la construcción del túnel.

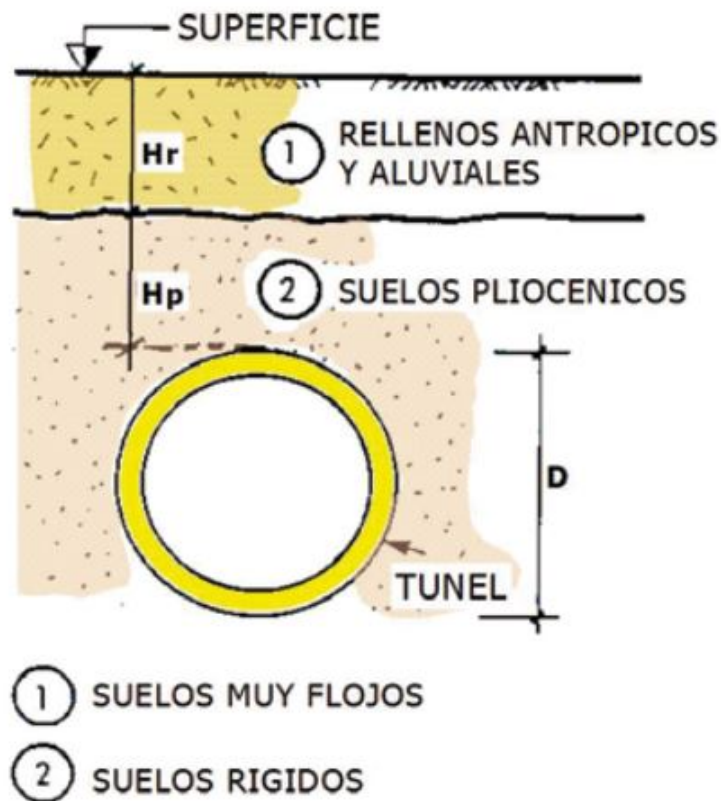


Figura 2.5: Perfil esquemático Modelo de Madrid (Oteo et al, 1999)

El esquema de la figura 2.5 muestra los dos niveles mencionados anteriormente, los cuales tienen las siguientes características:

- Nivel 1: Capa superficial construida por rellenos y suelos cuaternarios flojos. Estos materiales pueden tener un módulo de deformación en descompresión de 5 a 10 [MPa].
- Nivel 2: Constituido por los niveles más rígidos que constituyen el terciario (Mioceno y Plioceno). El módulo de deformación en descompresión oscila entre 50 [MPa] (arena de miga) y 225 [MPa] (tosco duro). El agrupar todos estos materiales en un único nivel queda justificado por los autores por la alternancia de las capas terciarias y por la gran diferencia con el módulo de deformación del nivel 1.

De acuerdo a esta configuración, el modelo de Madrid relaciona el volumen de asentos con el recubrimiento relativo superior (espesor del sustrato terciario por encima de la clave, dividido por el diámetro del túnel).

En la figura 2.6 se muestran los resultados obtenidos para las ampliaciones de las líneas 4 y 10 del Metro de Madrid. Aquí se puede notar como el volumen de asentos aumenta de forma considerable cuando el recubrimiento terciario es menor. Por otro lado, para valores bajos de  $H_p/D$  el volumen de asentos se amortigua.

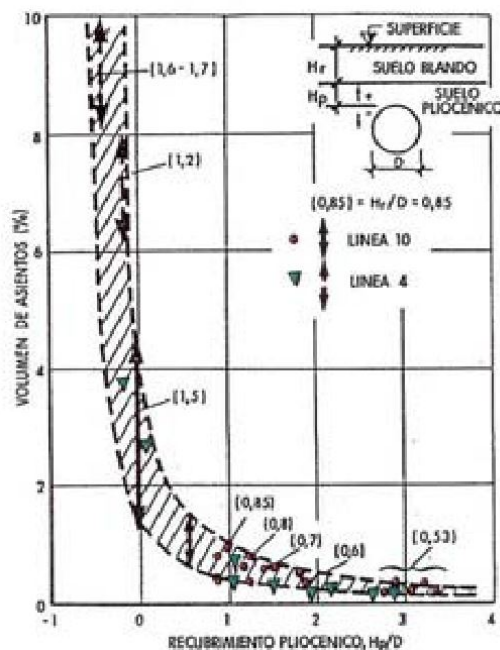


Figura 2.6: Volumen de asentos en ampliación del Metro de Madrid (Oteo, 2001)

De acuerdo a este modelo, es posible obtener el asentamiento máximo estimado según el gráfico de la figura 2.7.

El modelo de Madrid se complementa además con una serie de gráficos que son útiles para determinar los movimientos horizontales en superficie (figura 2.8), la extensión de los asentos superficiales en el eje longitudinal del túnel y en la superficie (figura 2.9) y movimientos horizontales y verticales en profundidad (figura 2.11).

Respecto a la aplicación del modelo y los asentos observados, los diferentes autores sacan las siguientes conclusiones:

- El espesor de los suelos superficiales (relleno) no tienen injerencia en los asentamientos cuando el recubrimiento terciario sobre la clave del túnel es mayor a dos veces el diámetro.
- Si la excavación se lleva a cabo solamente sobre recubrimientos cuaternarios se puede producir un socavón masivo.
- El modelo de Sagasetta y Oteo (1974) tiene un buen comportamiento cuando el recubrimiento terciario es mayor a 1,5 veces el diámetro.

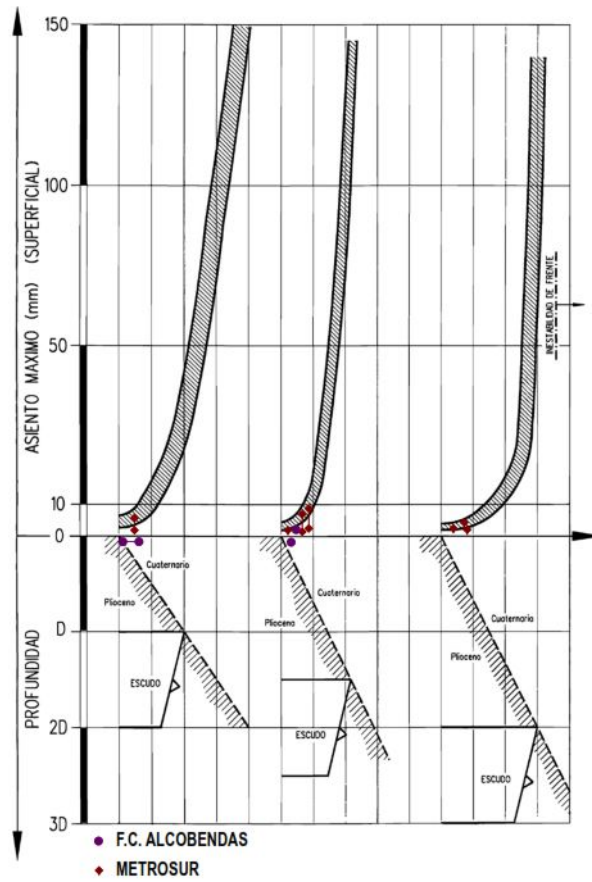


Figura 2.7: Estimación del asiento máximo. Modelo de Madrid (Oteo et al, 1999)

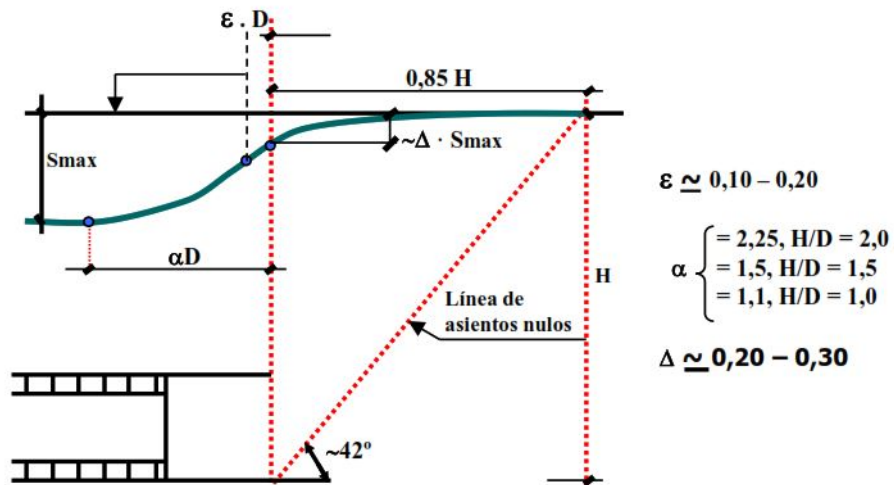


Figura 2.8: Ley semiempírica de asientos superficiales longitudinales sobre el eje del túnel (Oteo, 2001)

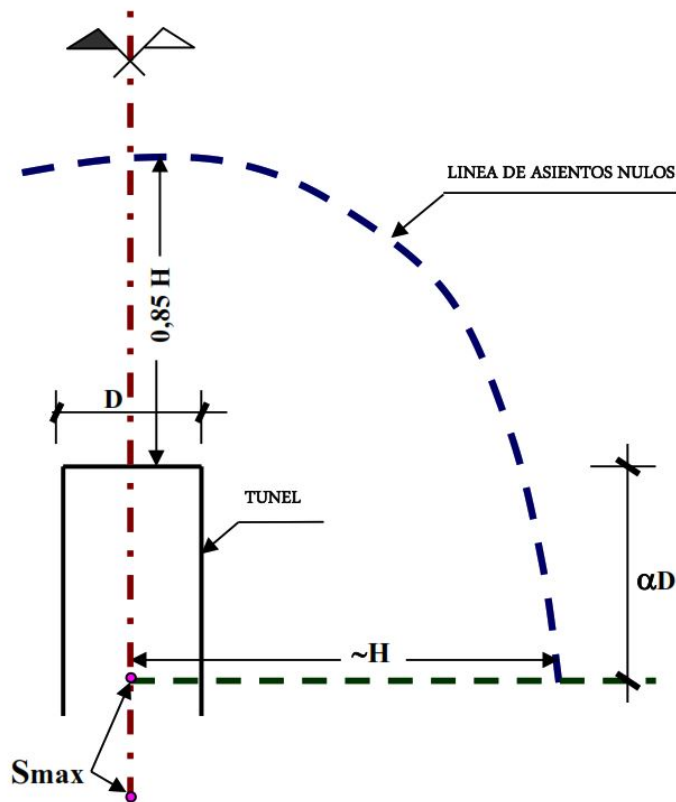


Figura 2.9: Definición semiempírica de la cubeta de Atterwell (Oteo, 2001)

### 2.3.2. Determinación del parámetro $i$

Para obtener localización del punto de inflexión del perfil de asentamientos, se generó una recopilación de modelos anteriores.

La figura 2.10 muestra la dependencia de este parámetro con las características del túnel para distintos tipos de suelo.

Para casos en que el perfil estratigráfico se compone por varios niveles de terreno (caso más común), se calcula un ponderado del coeficiente  $\eta$  en la ecuación 2.8, teniendo las siguientes consideraciones:

- Se estima el espesor de cada capa de terreno sobre la clave del túnel hasta la superficie ( $h_i$ )
- Se aplica un coeficiente en función de la proximidad a la clave del túnel:
  - 1 para niveles desde la clave del túnel hasta  $1,5D$  por encima de él.
  - 0,5 para niveles desde  $1,5D$  hasta la superficie.

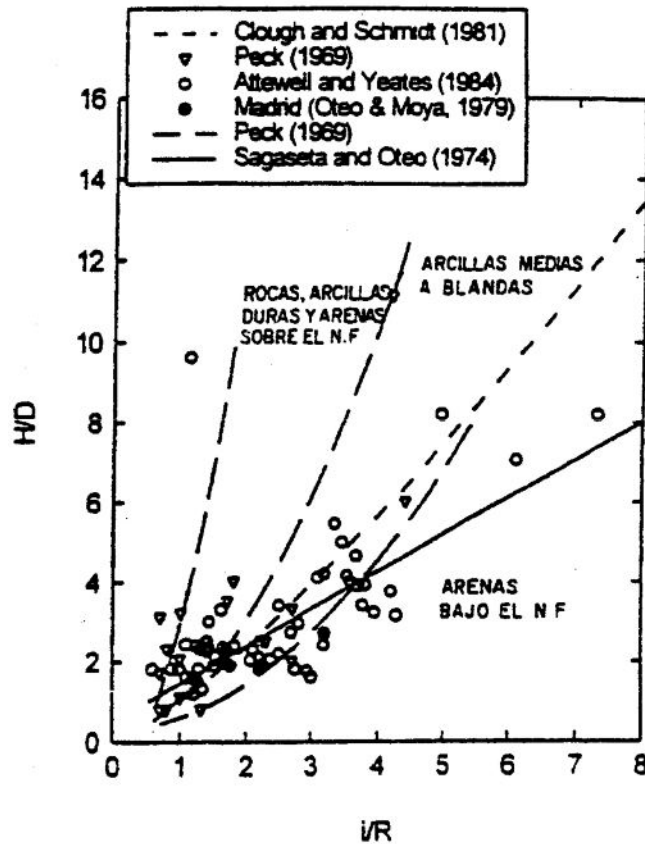


Figura 2.10: Localización del punto de inflexión (Oteo, 2001)

Así, el coeficiente se obtiene mediante la relación:

$$\eta = \frac{\sum \eta_i h_i}{\sum h_i} \quad (2.9)$$

### 2.3.3. Asentamientos en profundidad

Para deducir las subsidencias a una profundidad determinada  $z$  se propuso una hipótesis, la cual dice que el volumen de asientos en dicha cota se aproxima al volumen de asientos en superficie multiplicado por un factor de corrección (figura 2.11). De esta forma es posible estimar el asentamiento máximo en profundidad y el parámetro  $i$  a partir del superficial mediante las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$\delta_{Z,max} = \delta_{0,max} \cdot \frac{2H + D}{2H + D - 2Z} \cdot \theta \quad (2.10)$$

$$i_Z = i_0 \left(1 - \frac{2Z}{2H + D}\right) \quad (2.11)$$

Donde:

- $\delta_{Z,max}$ : Asentamiento máximo a profundidad "Z"
- $\delta_{0,max}$ : Asentamiento máximo en superficie
- $H$ : Profundidad del túnel
- $D$ : Diámetro equivalente del túnel
- $\theta$ : Coeficiente corrector, entre 0,8 y 1,0
- $i_z$ : Parámetro  $i$  a profundidad "Z"
- $i_0$ : Parámetro  $i$  en superficie

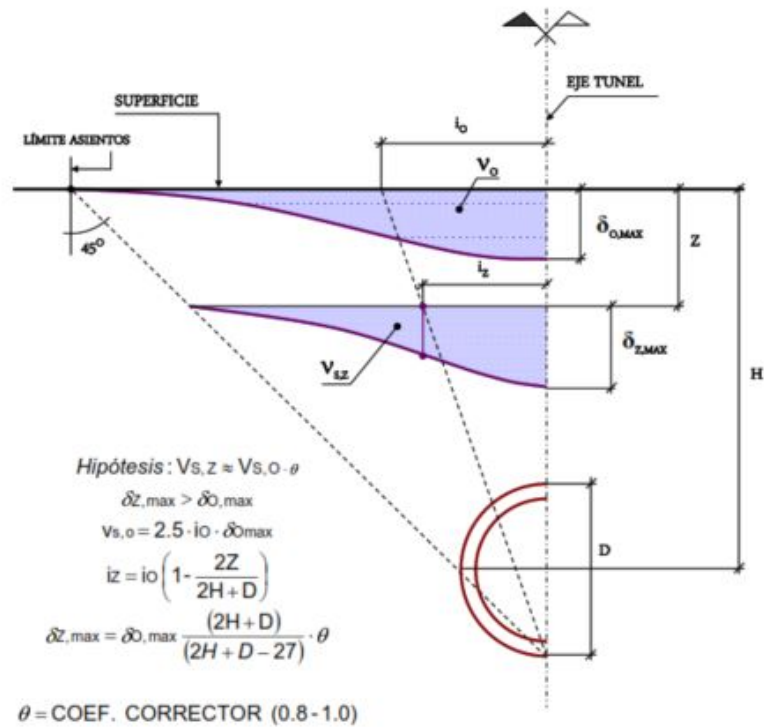


Figura 2.11: Determinación de asentamientos en el interior del terreno a partir de los superficiales (Oteo, 2003)

## 2.4. Nuevo Modelo de Madrid (2010)

### 2.4.1. Ley de Asientos

El Nuevo Modelo de Madrid nace como un complemento del estudio previo (Oteo et al, 1999), el cual generaba una estimación de los asientos para la ampliación de la red de Metro de Madrid. Así, disponiendo de los datos de la auscultación llevada a cabo durante la construcción de la ampliación de la red entre los años 2003 y 2007, se desarrolló el nuevo modelo.

El nuevo modelo relaciona el volumen de asientos con el recubrimiento relativo superior (espesor del sustrato terciario por encima de la clave, dividido por el diámetro del túnel)

La comparativa realizada en el estudio indica que el volumen de asientos estimado a partir de mediciones reales estaba influido por la naturaleza de la formación geotécnica y por el parámetro  $H_p/D$ . Sin embargo, también se analizó la influencia de la posición del punto de medida, presión en la cámara tuneladora y la cobertera total.

De esta forma, con un universo de 1204 casos clasificados según las condiciones nombradas anteriormente, se llegó a una serie ajustes logarítmicos.

Tabla 2.1: Leyes de variación de  $V_s$  en función de  $H_p/D$  según criterios analizados (Díez, 2010)

Criterio	Muestra	$n_{Total}$	Ley Logarítmica				Constante			
			$H_p/D \leq$	$n_1$	Ecuación	$R^2$	$H_p/D \geq$	$n_2$	Media	Des. St
Global	Todas	1204	1,89	864	$V_s = -0,4296 \ln(H_p/D) + 0,3432$	0,5110	1,89	340	0,070	0,046
Por Formaciones	Dendríticas	692	1,83	382	$V_s = -0,4089 \ln(H_p/D) + 0,3160$	0,4977	1,83	310	0,069	0,046
	Transición	106	2,00	106	$V_s = -0,3811 \ln(H_p/D) + 0,4264$	0,3083	2,00		0,162	
	Yesíferas	406	1,89	376	$V_s = -0,3849 \ln(H_p/D) + 0,3262$	0,4161	1,89	30	0,082	0,049
Por posición punto de medida	$x < i/2$	668	1,90	445	$V_s = -0,3587 \ln(H_p/D) + 0,3004$	0,4871	1,90	223	0,071	0,046
	$i/2 < x < 1,5$	402	1,87	319	$V_s = -0,4280 \ln(H_p/D) + 0,3482$	0,5126	1,87	83	0,080	0,045
	$x > 1,5$	133	1,83	99	$V_s = -0,6560 \ln(H_p/D) + 0,4727$	0,6870	1,83	34	0,076	0,047
Por presión en cámara EPB	$p_{EPB} > 0,2\gamma H$	215	1,99	202	$V_s = -0,4314 \ln(H_p/D) + 0,3491$	0,3578	1,99	13	0,052	0,032
	$0,1\gamma H < p_{EPB} < 0,2\gamma H$	596	1,85	465	$V_s = -0,4417 \ln(H_p/D) + 0,3509$	0,4798	1,85	131	0,080	0,048
	$p_{EPB} < 0,1\gamma H$	233	1,90	90	$V_s = -0,5545 \ln(H_p/D) + 0,4192$	0,6112	1,90	143	0,063	0,042
Por recubrimiento total	$H_t/D < 2$ ( $H_p/D < 2$ )	897	1,89	557	$V_s = -0,4307 \ln(H_p/D) + 0,3450$	0,4268	1,89	340	0,071	0,046
	$H_t/D > 2$ ( $H_p/D < 2$ )	647	1,89	307	$V_s = -0,3914 \ln(H_p/D) + 0,3202$	0,4538				

Al graficar todas las leyes logarítmicas según los criterios expuestos se obtuvieron los resultados de la figura 2.12.

El Nuevo Modelo de Madrid propone adoptar una ley única con las siguientes características:

- Para  $H_p/D < 1,90$ :  $V_s(\%) = -0,4296 \ln(H_p/D) + 0,3432$
- Para  $H_p/D > 1,90$ :  $V_s(\%) = 0,10$

Con los siguientes intervalos de tolerancia:

- Para  $H_p/D < 1,00$ :  $V_s(\%) \pm 0,30$
- Para  $1,00 < H_p/D < 1,50$ :  $V_s(\%) \pm 0,20$
- Para  $H_p/D > 1,50$ :  $V_s(\%) \pm 0,10$



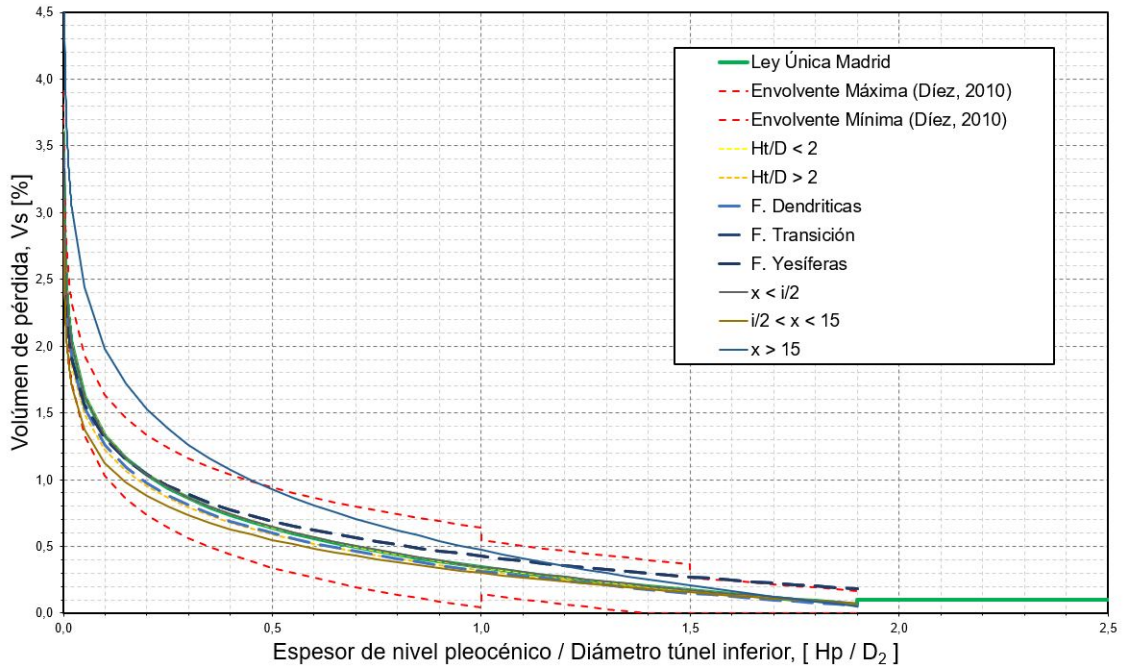


Figura 2.12: Leyes de variación de  $V_s$  en función de  $H_p/D$  según criterios analizados (Díez, 2010)

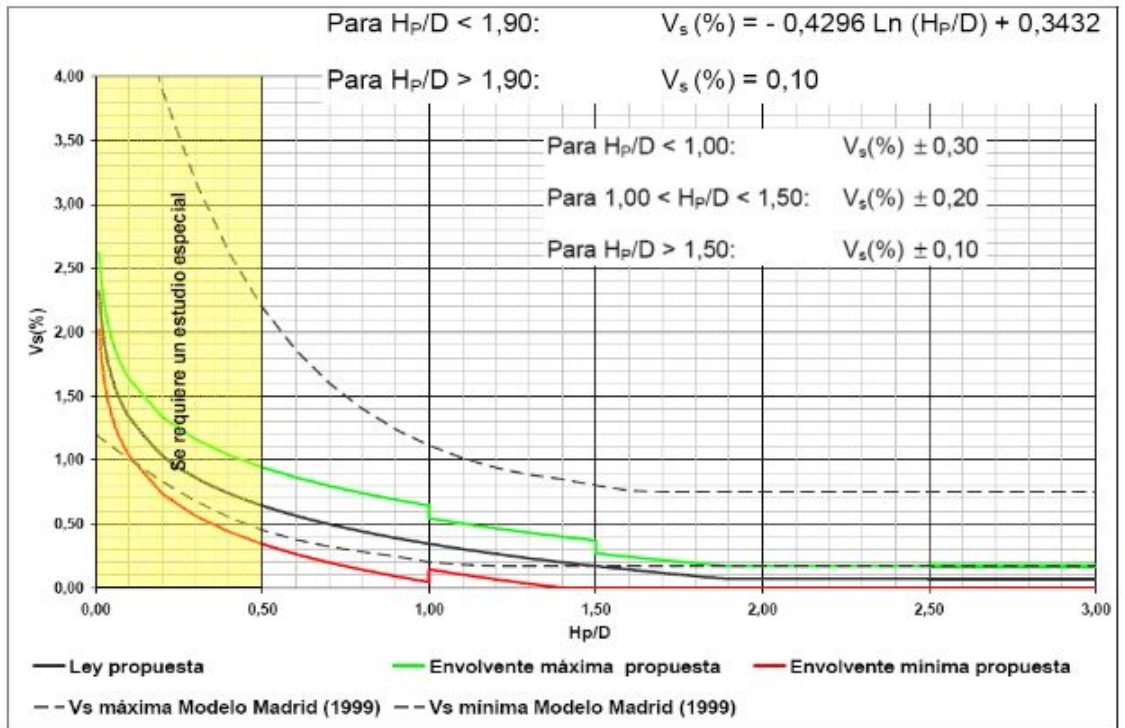


Figura 2.13: Extensión del Modelo de Madrid (Díez, 2011)

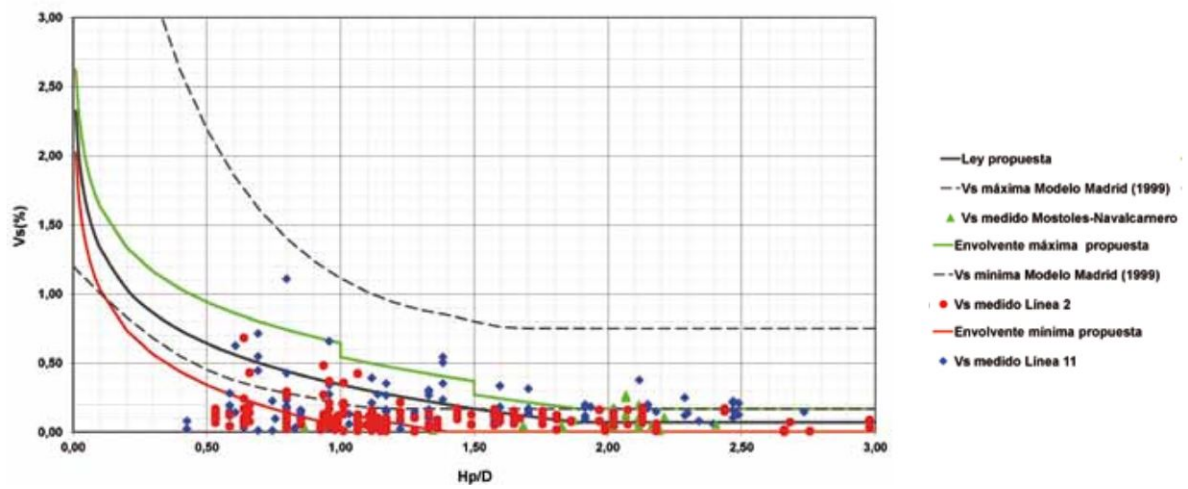


Figura 2.14: Validación del modelo, valores de Vs en las obras ejecutadas en el período 2007 - 2011 (Díez, 2014)

## **Capítulo 3**

# **Antecedentes Generales de la Construcción y Monitoreo de la Nueva Línea 3**

En este capítulo se describen las principales características del proyecto de la nueva línea 3 del Metro de Santiago.

Primeramente, se realiza una descripción general del proyecto, indicando trazado, longitudes, estaciones y áreas de influencia. Posteriormente, se indican las principales características de los túneles estación e interestación, los métodos constructivos a utilizar y los promedios de avance esperado de la construcción para piques, túneles y galerías.

Finalmente, se presenta una descripción de los métodos de monitoreo e instrumentación llevados a cabo antes y durante la construcción.

### 3.1. Proyecto Línea 3

#### 3.1.1. Trazado

El año 2013 comenzó la construcción de la nueva línea 3 del Metro de Santiago. El trazado de ella consta de 22 [km] de longitud con 18 estaciones que unen las comunas de Conchalí y La Reina, pasando por Independencia, Santiago y Ñuñoa (figura 3.1).

Debido a la gran longitud y el hecho de que esta línea une la zona norte con la zona oriente de Santiago implica que el diseño y la construcción del túnel se enfrente a diferentes tipos de suelo. Así, la línea 3 se construye principalmente sobre grava de Santiago, sin embargo, también se encuentra con suelos finos en sus extremos, hallándose sobre suelos de transición a medida que se avanza hacia el centro de la ciudad (figura 3.2).

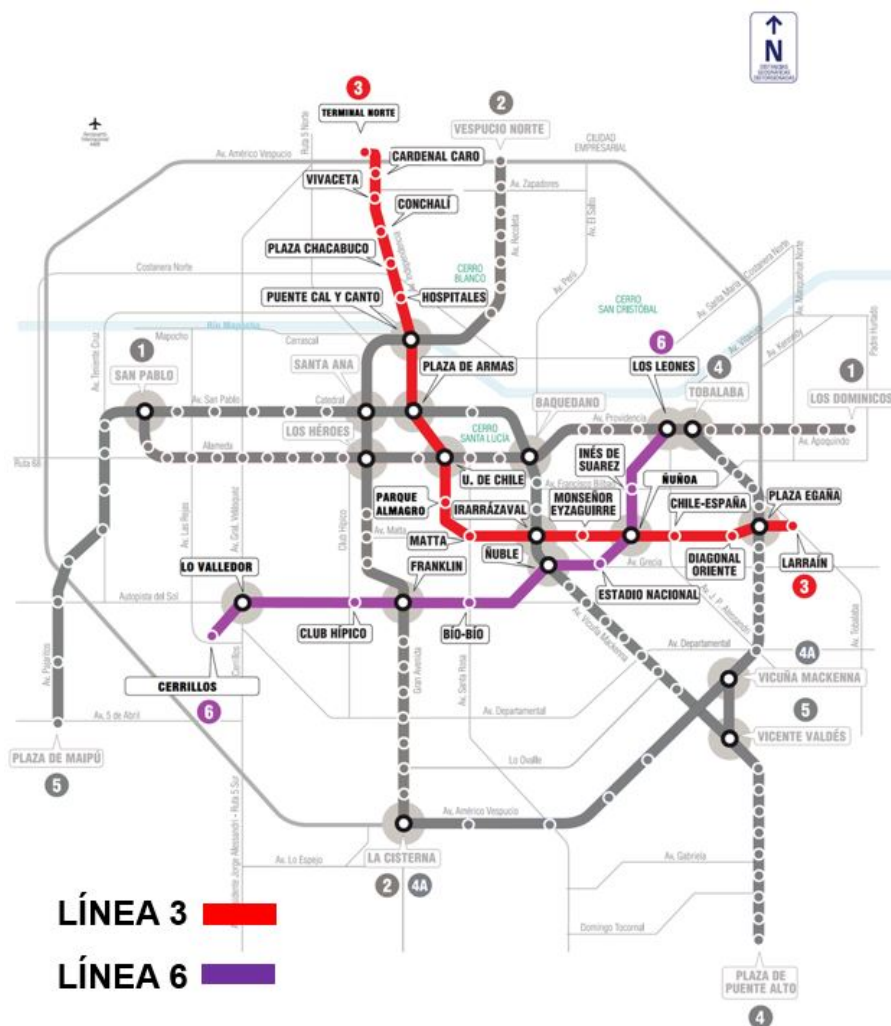


Figura 3.1: Trazado línea 3 y 6 del Metro de Santiago (Montes y Pozo, 2015).



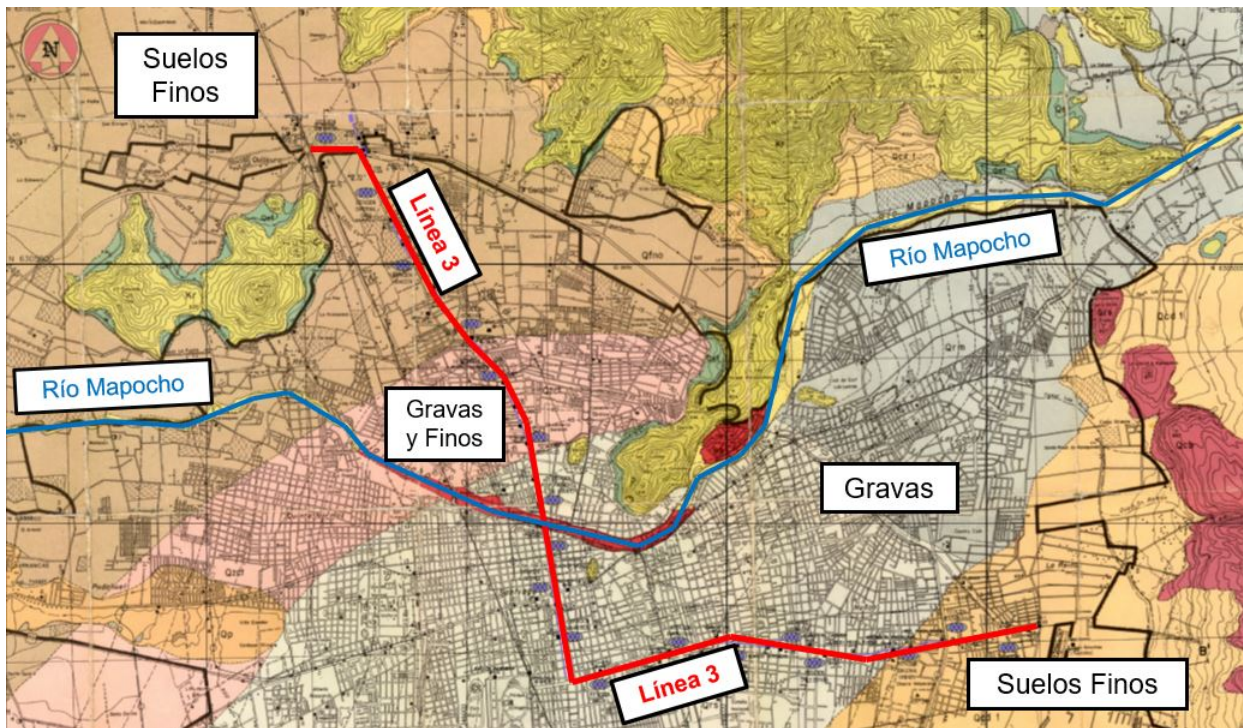


Figura 3.2: Carta geológica de Santiago y trazado línea 3 (Montes y Pozo, 2015).

Así, el trazado de la línea 3 se sectorizó según la estratigrafía característica presente en cada uno de ellos (Anexo B):

- **Tramo A, Finos del Noroeste:** Desde Cola de Maniobras hasta estación Cardenal Caro.
- **Tramo B, Transición Finos del Noroeste a Gravas del Río Mapocho:** Desde estación Cardenal Caro a estación Plaza Chacabuco.
- **Tramo C, Gravas del Río Mapocho:** Desde estación Plaza Chacabuco a estación Diagonal Oriente.
- **Tramo D, Gravas del Río Mapocho y Finos de Cono de Deyección:** Desde estación Diagonal Oriente hasta Cola de Maniobras de estación Larraín.

### 3.1.2. Tipos de estaciones y túneles

Las estaciones de la línea 3 se clasifican según el ancho de sus andenes:

- Estaciones grandes: Andén = 5 [m] (figura 3.3)
  - Los Libertadores
  - Plaza de Armas
  - Universidad de Chile
  - Plaza Egaña

- Estaciones medianas: Andén = 4 [m] (figura 3.4)
  - Cardenal Caro
  - Conchalí
  - Vivaceta
  - Plaza Chacabuco
  - Hospitales
  - Cal y Canto
  - Irrazával
  - Chile España
  - Larraín
  
- Estaciones pequeñas: Andén = 3 [m] (figura 3.5)
  - Parque Almagro
  - Avenida Matta
  - Monseñor Eyzaguirre
  - Diagonal Oriente

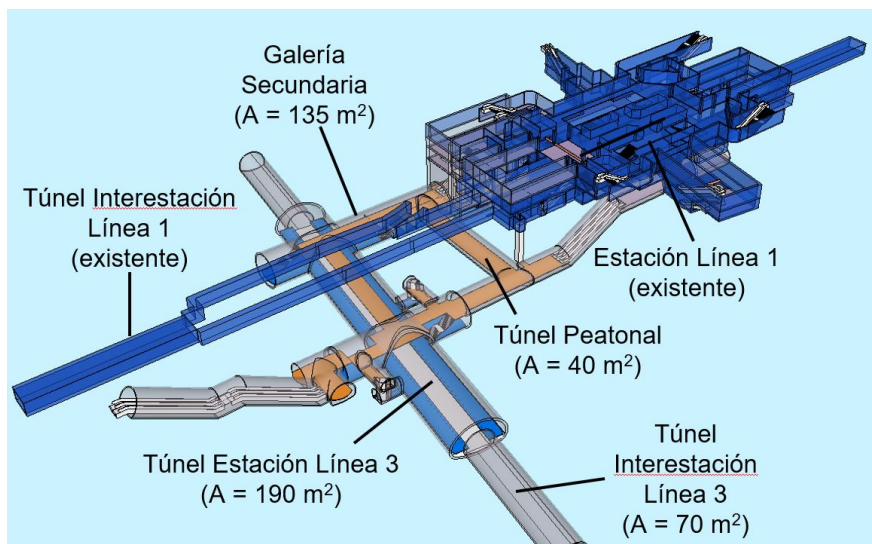


Figura 3.3: Estación grande (Montes y Pozo, 2015).

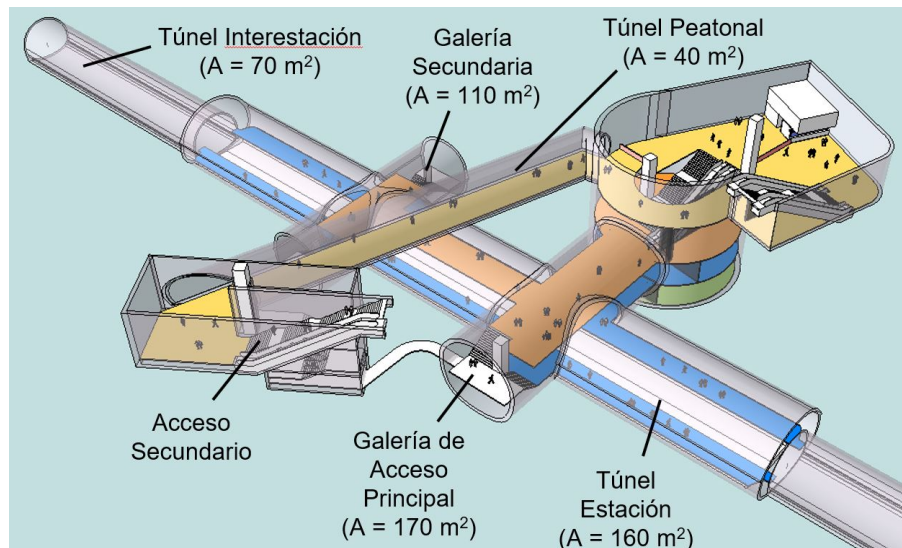


Figura 3.4: Estación mediana (Montes y Pozo, 2015).

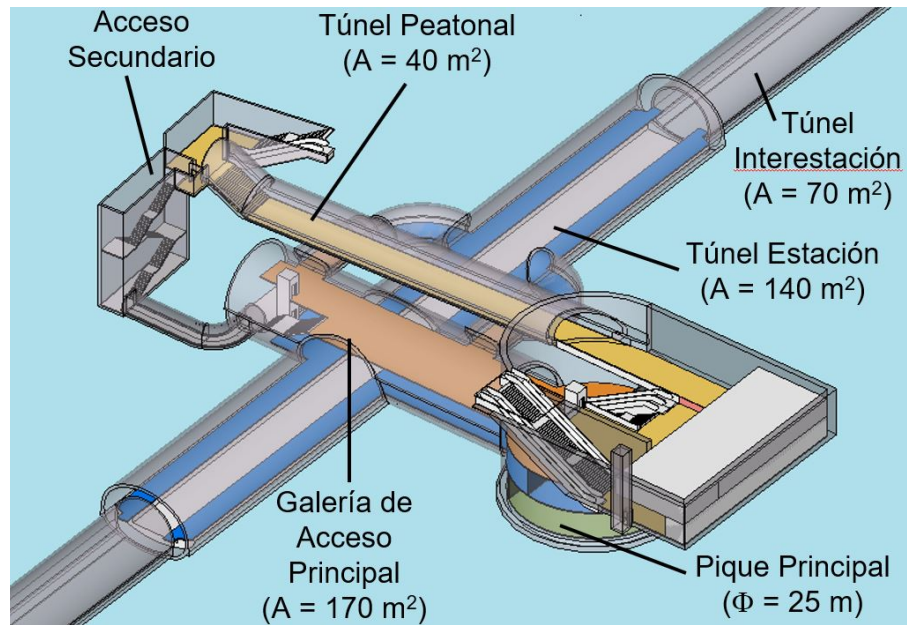


Figura 3.5: Estación pequeña (Montes y Pozo, 2015).

El diseño de los túneles depende del tipo de suelo en el que se sostendrá. Así, la línea 3 se compone de dos tipos de túneles: Uno sin contrabóveda (figuras 3.6 y 3.7) y uno con contrabóveda (figuras 3.8 y 3.9).

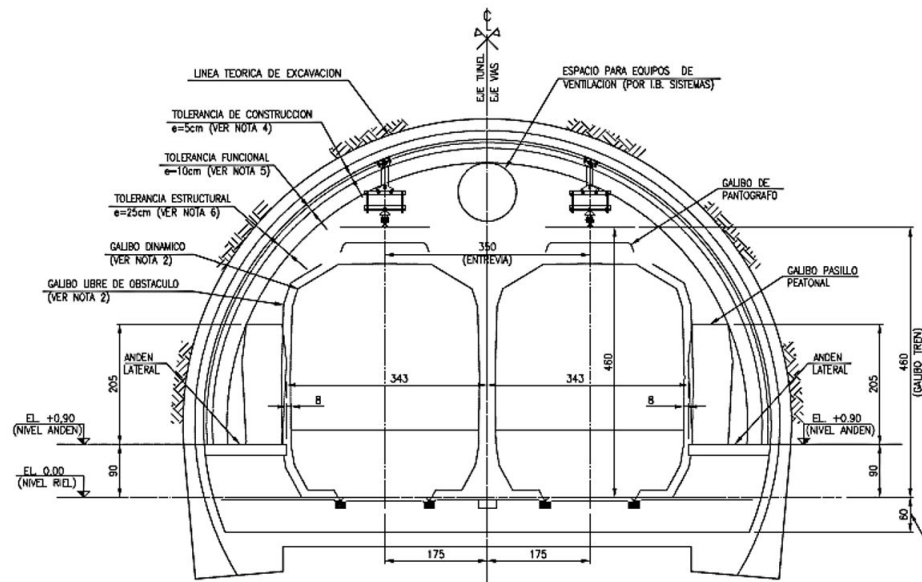


Figura 3.6: Túnel estación tipo "Herradura" para gravas (Montes y Pozo, 2015).

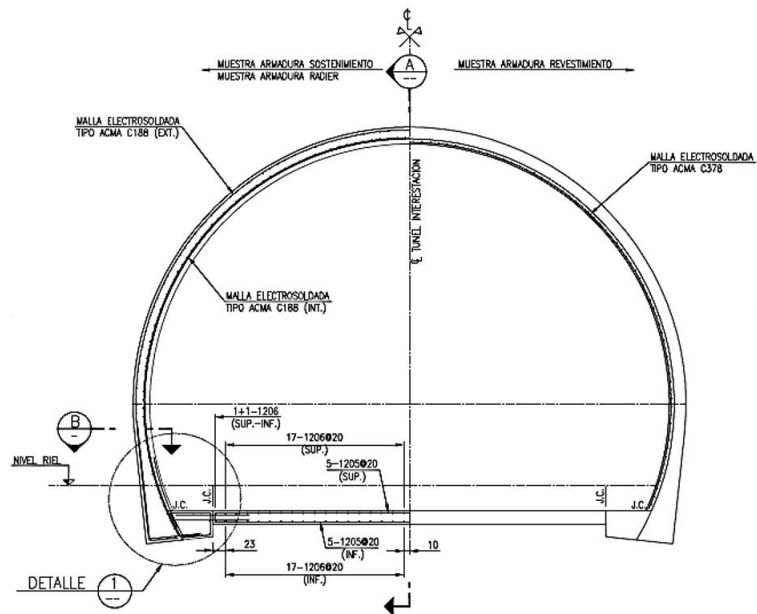


Figura 3.7: Túnel interestación tipo "Herradura" para gravas (Montes y Pozo, 2015).



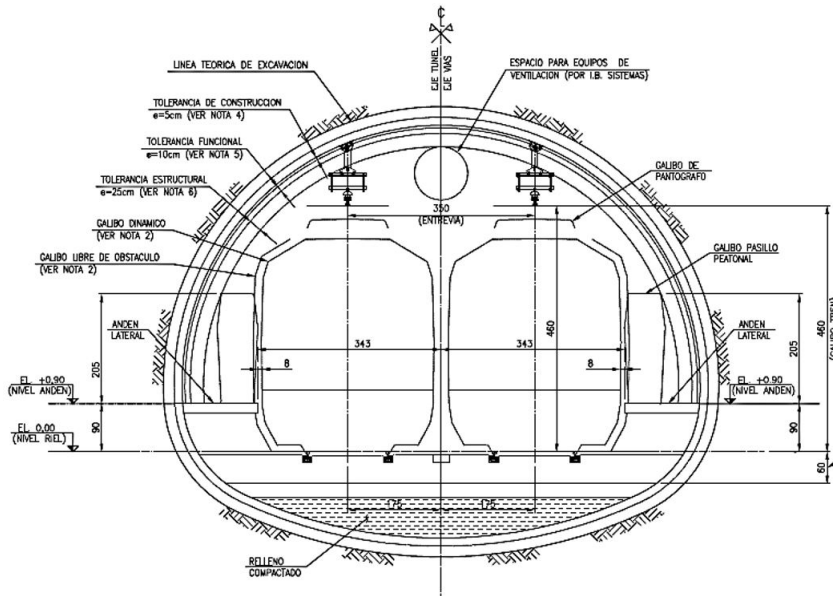


Figura 3.8: Túnel estación para suelos finos (Montes y Pozo, 2015).

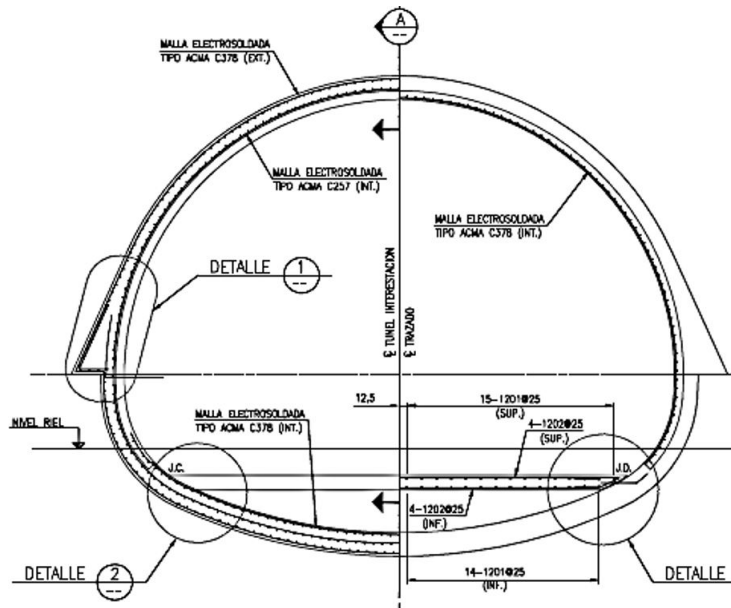


Figura 3.9: Túnel interestación para suelos finos (Montes y Pozo, 2015).

### 3.1.3. Excavación de piques, galerías y túneles

La obra gruesa de la construcción de una línea de Metro se compone principalmente de piques, galerías y túneles. El diseño de ellos y de los métodos constructivos dependen de los tipos de suelo y de las dimensiones de los túneles.

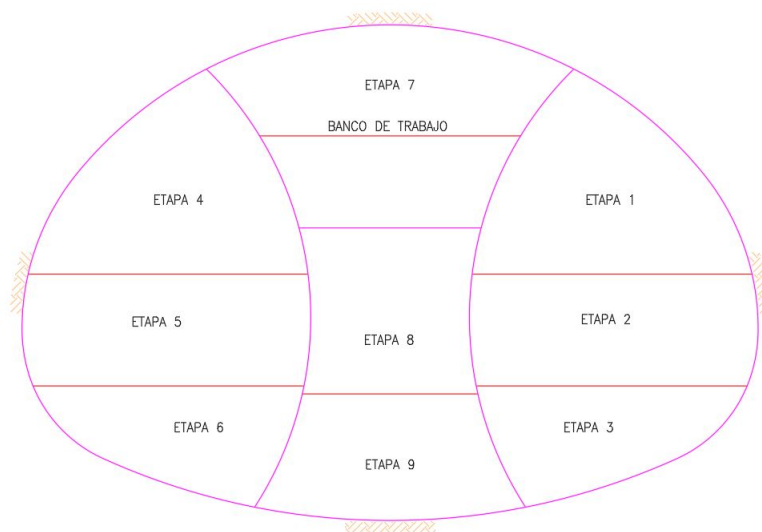


Figura 3.10: Secuencia constructiva doble side drift, estaciones grandes (Montes y Pozo, 2015).

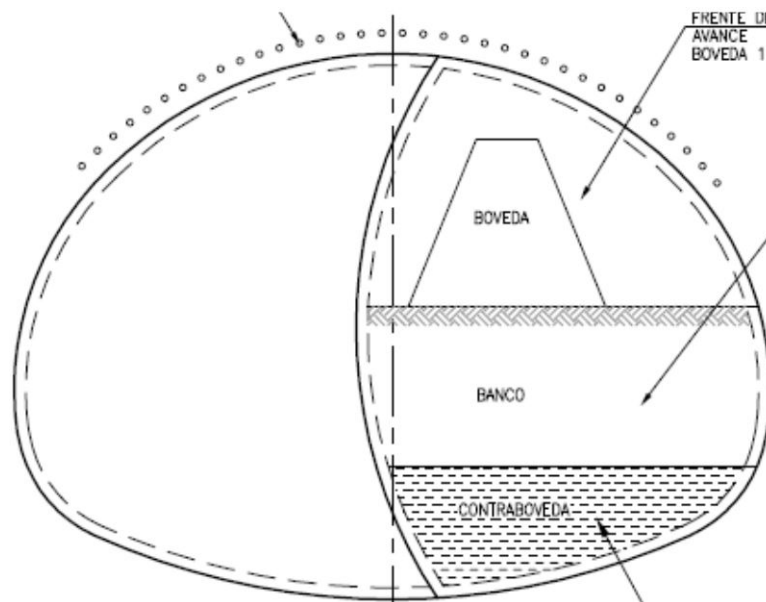


Figura 3.11: Secuencia constructiva single side drift, estaciones medianas (Montes y Pozo, 2015).

Las siguientes tablas muestran las dimensiones promedio de túneles, piques y galerías junto con las velocidades esperadas de construcción.

Tabla 3.1: Dimensiones promedio de túneles estación y velocidad de avance (Montes y Pozo, 2015).

Ítem	Unidad	Valor
Área Teórica del Túnel	m <sup>2</sup>	170 a 190
Diámetro	m	15 a 16
Longitud	m	120
Velocidad de Construcción	m/día	0,2 a 0,5

Tabla 3.2: Dimensiones promedio de túneles interestación y velocidad de avance (Montes y Pozo, 2015).

Ítem	Unidad	Valor
Área Teórica del Túnel	m <sup>2</sup>	60 a 70
Diámetro	m	8,5 a 9,5
Velocidad de Construcción	m/día	0,7 a 2,8

Tabla 3.3: Dimensiones promedio de piques y velocidad de avance (Montes y Pozo, 2015).

Ítem	Unidad	Valor
Diámetro	m	15, 20 y 25
Profundidad	m	25 a 35
Velocidad de Construcción	m/día	3 a 5
Tiempo total	meses	6 a 8

Tabla 3.4: Dimensiones promedio de galerías y velocidad de avance (Montes y Pozo, 2015).

Ítem	Unidad	Valor
Área Teórica del Túnel	m <sup>2</sup>	95 a 170
Diámetro	m	11 a 15
Longitud	m	25 a 55
Velocidad de Construcción	m/día	0,5 a 0,7

## 3.2. Monitoreo Geotécnico

La construcción de un túnel subterráneo implica el movimiento de grandes cantidades de suelo bajo construcciones en superficie, y, en este caso específico, bajo otros túneles existentes. Debido a ello es que las excavaciones deben ser controladas y monitoreadas periódicamente procurando que no se excedan los umbrales de colapso y de serviciabilidad, verificando además la estabilidad de la excavación.

Por otro lado, el monitoreo geotécnico es la herramienta que permite medir el desempeño de las excavaciones durante la construcción (Montes y Pozo, 2015), para con ello evaluar si se cumple con los promedios de avance de la obra.

Para el proyecto de construcción de la línea 3 se llevaron a cabo los siguientes monitoreos en superficie y en profundidad (Montes y Pozo, 2015):

- **Monitoreo en Superficie:**
  - Control de asentamientos del terreno
  - Controles en edificios cercanos
- **Monitoreo en el interior del túnel:**
  - Control de convergencias
  - Control de carga del terreno sobre el sostenimiento
  - Control de esfuerzos en el sostenimiento

### **3.3. Instrumentación**

Para llevar el control y verificar la estabilidad de la excavación se llevó a cabo una instrumentación que consta de una variada gama de instrumentos, entre los que se pueden encontrar:

- Punto de control de asentamientos superficiales (AS)
- Electronivel
- Punto superficial (PS)
- Punto de control de asentamientos de edificaciones (AE)
- Punto de control de convergencia (PC)
- Inclinómetro

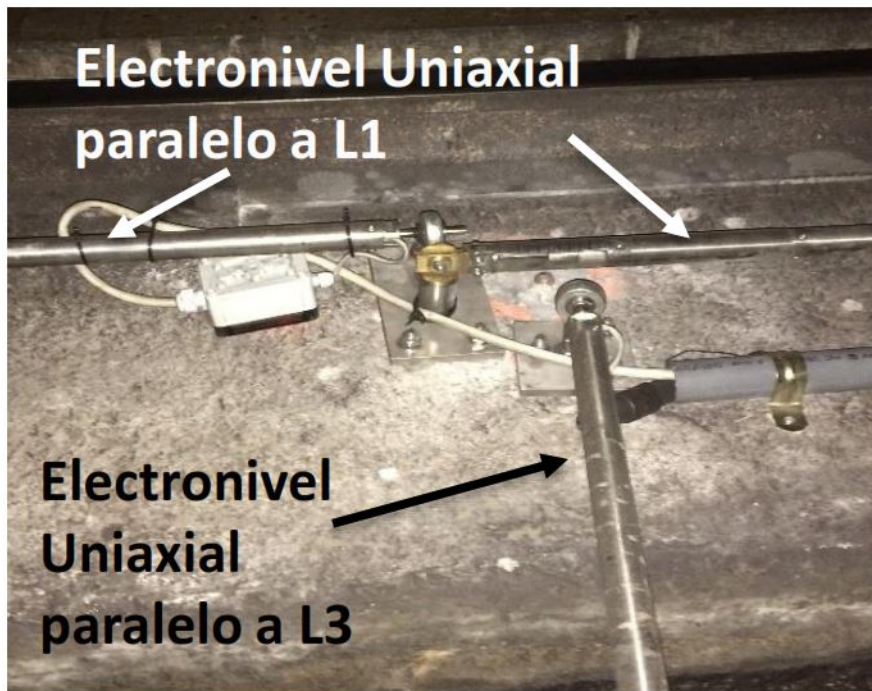
Sin embargo, en esta investigación se trabajará solo con asentamientos verticales en superficie y en profundidad.

#### **3.3.1. Asentamientos en profundidad**

Para monitorear los asentamientos en las líneas existentes se llevó a cabo un control que consiste en la instrumentación de puntos de control AS y electroniveles. Este último se utilizó por la imposibilidad de realizar lecturas convencionales debido al funcionamiento diario del Metro. Sin embargo, la sensibilidad de este instrumento bajo vibraciones hace necesaria la complementación con métodos convencionales presenciales.

#### **Electronivel**

A modo de llevar un control permanente de los asentamientos en las líneas existentes se instalaron electroniveles uniaxiales de forma paralela al eje de la línea 3 y paralela al eje de la línea existente. A su vez, se instalaron electroniveles biaxiales paralelos a la línea 3 (figura 3.12). Así, la Unidad de Monitoreo llevó el control remoto verificando que los asentamientos no sobrepasaran los umbrales de serviciabilidad.



*Figura 3.12: Disposición de electroniveles a nivel de losa de línea 1 (Torres, 2014).*

### **Punto de control de asentamientos superficiales (AS)**

Para llevar un control de asentamientos más preciso, se instalaron puntos AS sobre las líneas existentes como se muestra en la figura 3.13.

Un perno de acero tipo A63-42H de 25 [mm] de diámetro se inserta en una tubería de 5 pulgadas, la cual es rellena con lechada de cemento, y dispuesta sobre un bulbo de hormigón. El perno se inserta hasta una profundidad que depende del espesor de la losa, para ser medido periódicamente mediante métodos geodésicos (estación total), utilizando puntos de referencia de cota fija.

Estos puntos fueron medidos periódicamente durante la noche con estación total, para con ello complementar la información entregada por los electroniveles y poder calibrar su funcionamiento.

### **3.3.2. Asentamientos en superficie**

#### **Punto superficial (PS)**

Para medir las subsidencias del túnel existente en la superficie se instalaron puntos PS, los cuales consisten en barras de 25 [mm] de diámetro que se introducen en un tubo de PVC de 50 [mm] de diámetro, ambos apoyados sobre la clave del túnel. El asentamiento del túnel se mide mediante métodos geodésicos (estación total) en la superficie producto del movimiento de la barra de acero.(figuras 3.15 y 3.16)

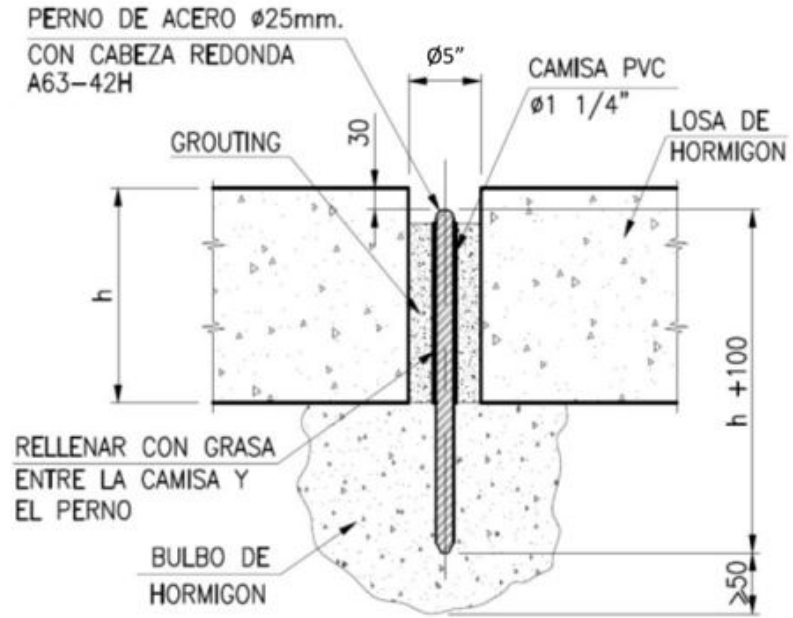


Figura 3.13: Perfil transversal, punto de control de asentamiento superficial (Montes y Pozo, 2015).



Figura 3.14: Fotografía en planta, punto de control de asentamiento superficial (Montes y Pozo, 2015).

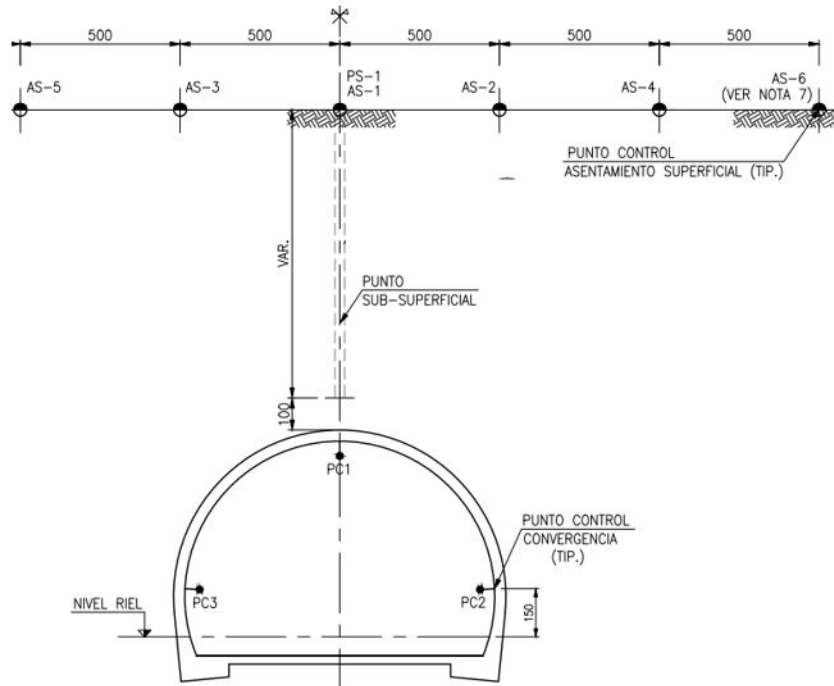


Figura 3.15: Punto de control superficial (Montes y Pozo, 2015).

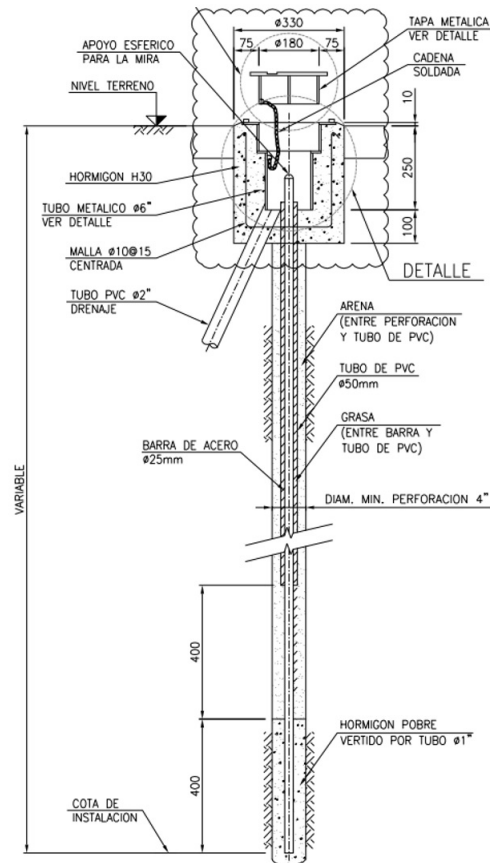


Figura 3.16: Detalle punto de control superficial (Montes y Pozo, 2015).

### **3.4. Unidad Geotécnica Grava de Santiago**

En el anexo B de este documento, apartado 8.2.4, se muestra una descripción geotécnica de los suelos para los cinco cruces de la línea 3 en estudio. Estas descripciones fueron entregadas por el consorcio AWWA a Metro de Santiago en el informe de mecánica de suelos.

En los cinco cruces se encuentra presente la unidad geotécnica grava de Santiago, aunque predomina en cuatro de ellos (estación Cal y Canto, estación Plaza de Armas, estación Universidad de Chile y estación Irrazaval).

La grava de Santiago corresponde a un sedimento de tipo cuaternario proveniente de la erosión de los cordones montañosos que rodean la cuenca de Santiago, los cuales son transportados y depositados por el río Mapocho en la zona norte y por el río Maipo en la zona sur.

En la depositación Mapocho se identifican dos horizontes. El primero llamado 2<sup>da</sup> depositación se extiende hasta una profundidad entre 4,5 a 6,5 [m] de profundidad, y tiene propiedades mecánicas similares a la depositación Maipo. Bajo ella se encuentra la 1<sup>ra</sup> depositación de origen fluvio glacial. Esta posee una gradación similar a la anterior, pero con mayor cantidad de finos y una compacidad mayor.

La grava de Santiago posee una compacidad alta y muy buena gradación. Posee lentes de arena y finos arcillosos. Presenta color gris con variaciones a pardo rojizo. La mayoría de los clastos que posee son duros, con forma subredondeada a redondeada y su granulometría varía entre bolones de tamaño hasta 12” hasta arenas con poco porcentaje de finos (Mora, 2000)

Clasificación USCS: GW; GP; GW-GM; GP-GM; GM-GC; GC.



# Capítulo 4

## Perfiles Transversales de Asentamiento

El consorcio AWWA realizó el monitoreo de los asentamientos sobre las líneas existentes periódicamente, procurando que éstos no excedieran los umbrales de alarma. Para ello, se hizo una instrumentación en puntos específicos de cada cruce que otorgaron la información con la cual se trabaja en esta sección.

Primeramente, se toman los registros de asentamiento para cuando estos alcanzaron sus valores máximos, para con ello construir los perfiles de asentamiento que representen de mejor forma la distribución de puntos medidos. Así, se genera una comparación de resultados para con ello evaluar la precisión de las estimaciones de los modelos (Anexo C).

Además, se determinan los valores del parámetro  $i$  de forma que el ajuste de distribución normal sea lo más cercano a los puntos obtenidos mediante auscultación, asegurando una alta correlación de estos puntos.

## 4.1. Asentamientos medidos en profundidad

### 4.1.1. Estación Cal y Canto

La vista en planta de la figura 8.7 (Anexo C), muestra cómo en la estación Cal y Canto se tiene una condición de cruce de túnel estación con túnel estación. La figura 4.1 muestra los asentamientos en milímetros de los puntos de medición a lo largo de la vía de la línea 2.

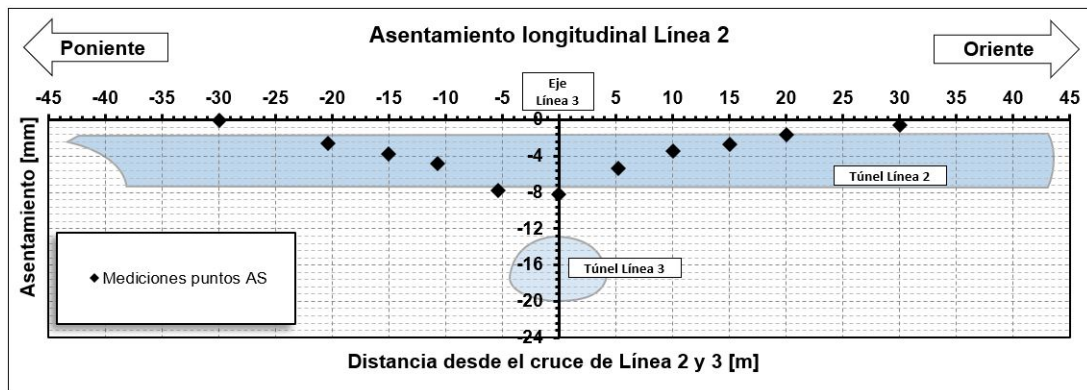


Figura 4.1: Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 2

De esta forma, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1 (Peck, 1969).

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -8,2 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 10,26^2}\right)$$

Así, el perfil de desplazamientos queda representado por la siguiente curva.

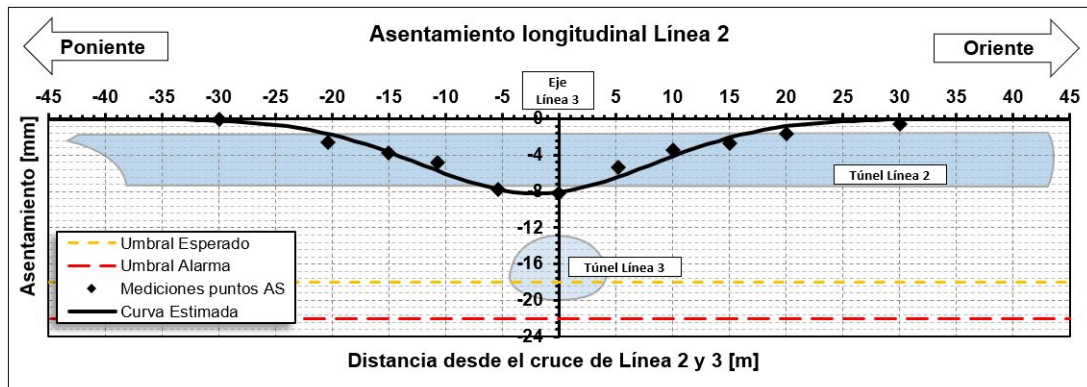


Figura 4.2: Curva de desplazamientos verticales, Estación Cal y Canto

La siguiente tabla muestra la comparativa entre las estimaciones de asentamientos (Metro. 2013. A) y el desplazamiento real medido.

Tabla 4.1: Desplazamiento vertical real y estimado, estación Cal y Canto

Asentamiento Real [mm]	Asentamiento Estimado [mm]	Rango de Estimación [mm]	Precisión
8,2	18	13 - 23	46 %

#### 4.1.2. Estación Plaza de Armas

La vista en planta de la figura 8.11 (Anexo C), muestra cómo en la estación Plaza de Armas se tiene una condición de cruce de túnel interestación con túnel estación. La siguiente figura muestra los asentamientos en milímetros de los puntos de medición a lo largo de la vía de la línea 5.

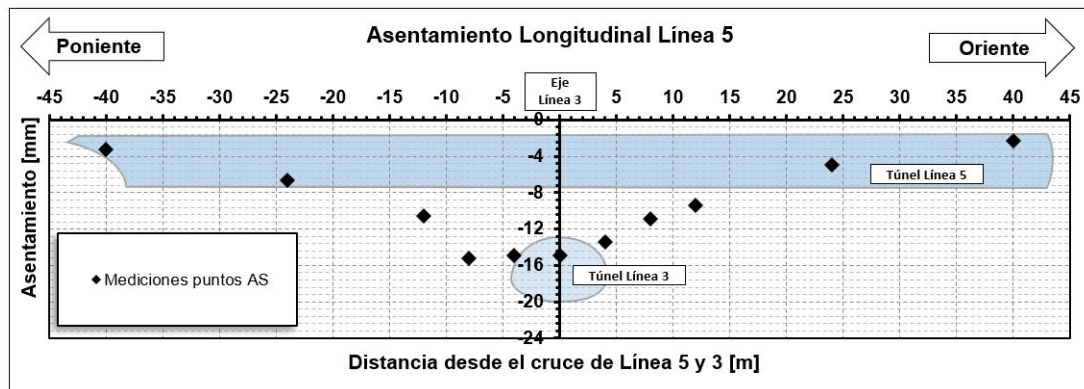


Figura 4.3: Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 5

De esta forma, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1 (Peck, 1969).

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -15 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 15,53^2}\right)$$

Así, el perfil de desplazamientos queda representado por la siguiente curva.

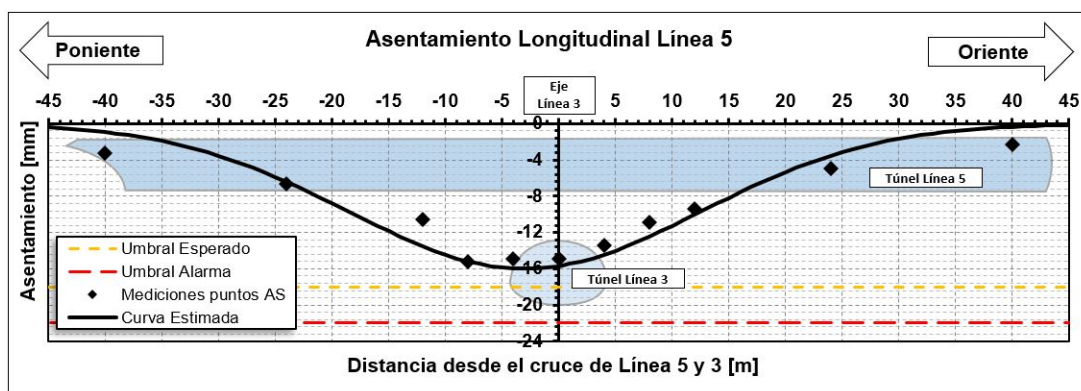


Figura 4.4: Curva de desplazamientos verticales, Estación Plaza de Armas

La siguiente tabla muestra la comparativa entre las estimaciones de asentamientos (Metro. 2013. A) y el desplazamiento real medido.

Tabla 4.2: Desplazamiento vertical real y estimado, estación Plaza de Armas

Asentamiento Real [mm]	Asentamiento Estimado [mm]	Rango de Estimación [mm]	Precisión
15	15	8 - 22	100 %

### 4.1.3. Estación Universidad de Chile

La vista en planta de la figura 8.15 (Anexo C), muestra cómo en la estación Universidad de Chile se tiene una condición de cruce de túnel interestación con túnel estación. La siguiente figura muestra los asentamientos en milímetros de los puntos de medición a lo largo de la vía de la línea 1.

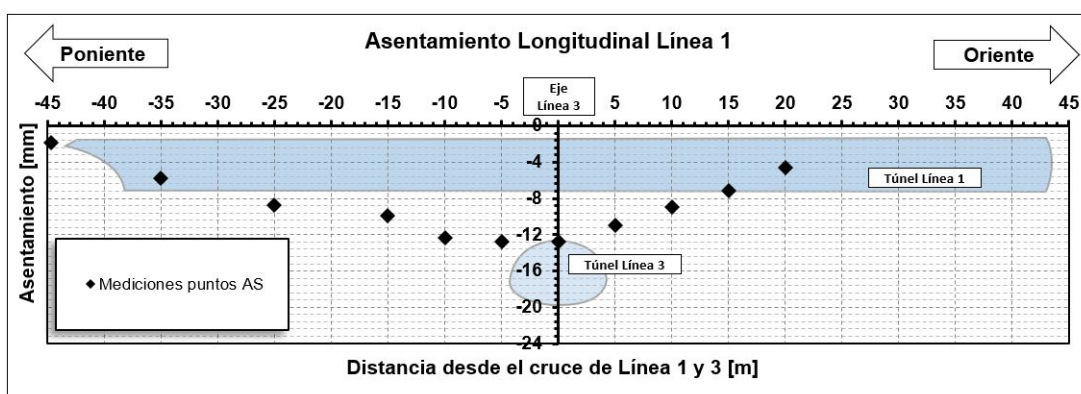


Figura 4.5: Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 1

De esta forma, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1 (Peck, 1969).

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -13 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 19,60^2}\right)$$

Así, el perfil de desplazamientos queda representado por la siguiente curva.

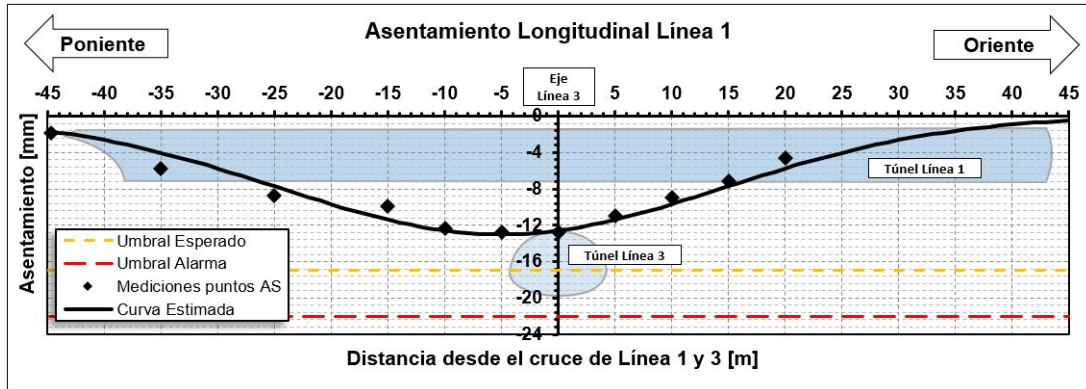


Figura 4.6: Curva de desplazamientos verticales, Estación Universidad de Chile

La siguiente tabla muestra la comparativa entre las estimaciones de asentamientos (Metro. 2013. A) y el desplazamiento real medido.

Tabla 4.3: Desplazamiento vertical real y estimado, estación Universidad de Chile

Asentamiento Real [mm]	Asentamiento Estimado [mm]	Rango de Estimación [mm]	Precisión
13	17	8 - 26	76 %

#### 4.1.4. Estación Irrarázaval

La vista en planta de la figura 8.19 (Anexo C), muestra cómo en la estación Irrarázaval se tiene una condición de cruce de túnel interestación con túnel estación. La siguiente figura muestra los asentamientos en milímetros de los puntos de medición a lo largo de la vía de la línea 5.

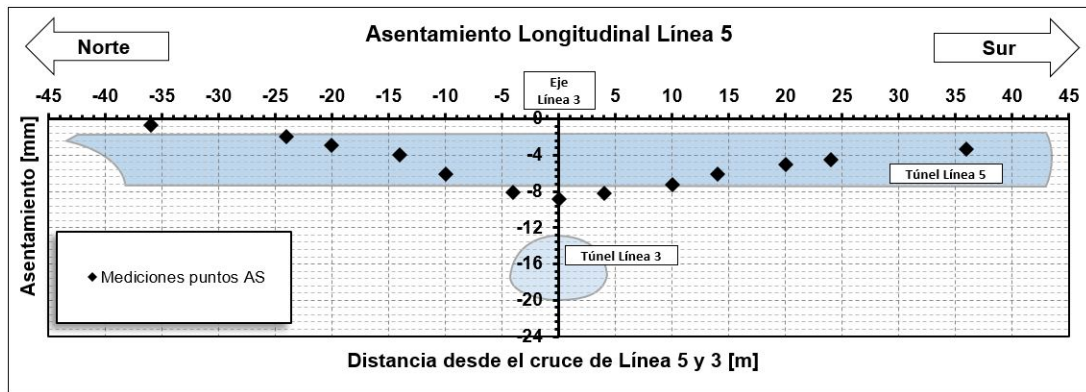


Figura 4.7: Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 5

De esta forma, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1 (Peck, 1969).

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -8,8 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 16,16^2}\right)$$

Así, el perfil de desplazamientos queda representado por la siguiente curva.

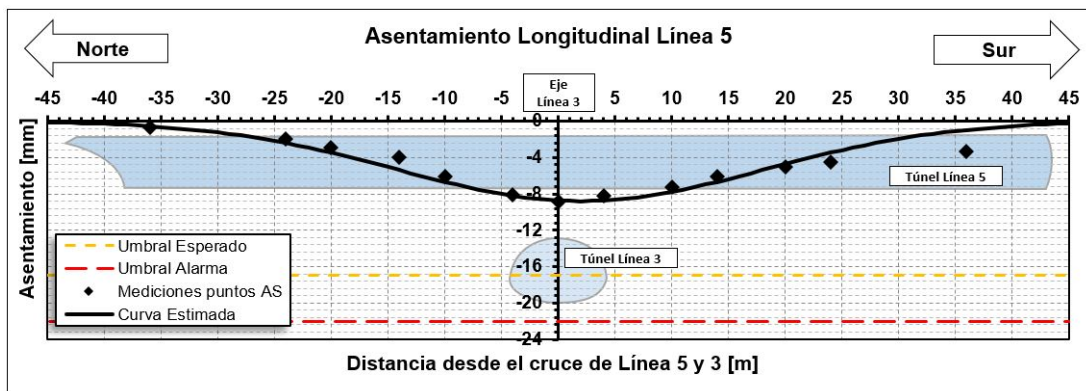


Figura 4.8: Curva de desplazamientos verticales, Estación Irrarázaval

La siguiente tabla muestra la comparativa entre las estimaciones de asentamientos (Metro. 2013. A) y el desplazamiento real medido.

Tabla 4.4: Desplazamiento vertical real y estimado, estación Irrarázaval

Asentamiento Real [mm]	Asentamiento Estimado [mm]	Rango de Estimación [mm]	Precisión
8,8	17	12 - 22	52 %



#### 4.1.5. Estación Plaza Egaña

La vista en planta de la figura 8.23 (Anexo C), muestra cómo en la estación Plaza de Armas se tiene una condición de cruce de túnel interestación con túnel interestación. La siguiente figura muestra los asentamientos en milímetros de los puntos de medición a lo largo de la vía de la línea 4.

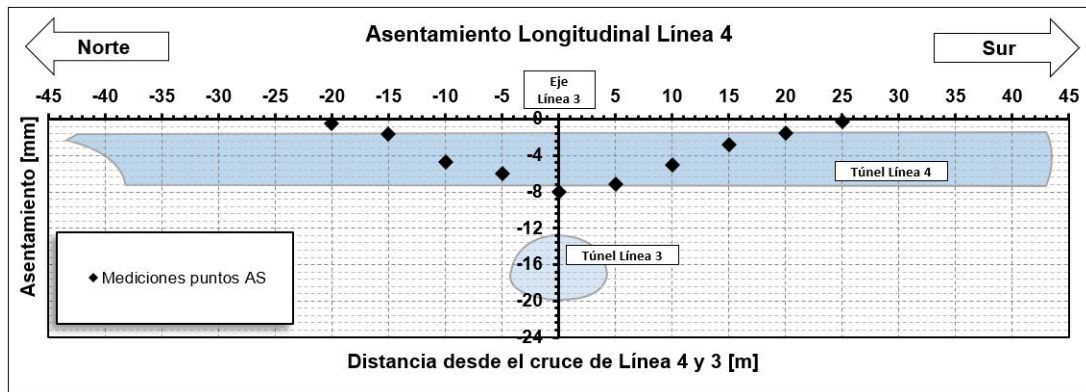


Figura 4.9: Desplazamientos verticales a nivel de vías Línea 4

De esta forma, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1 (Peck, 1969).

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -8,0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 9,56^2}\right)$$

Así, el perfil de desplazamientos queda representado por la siguiente curva.

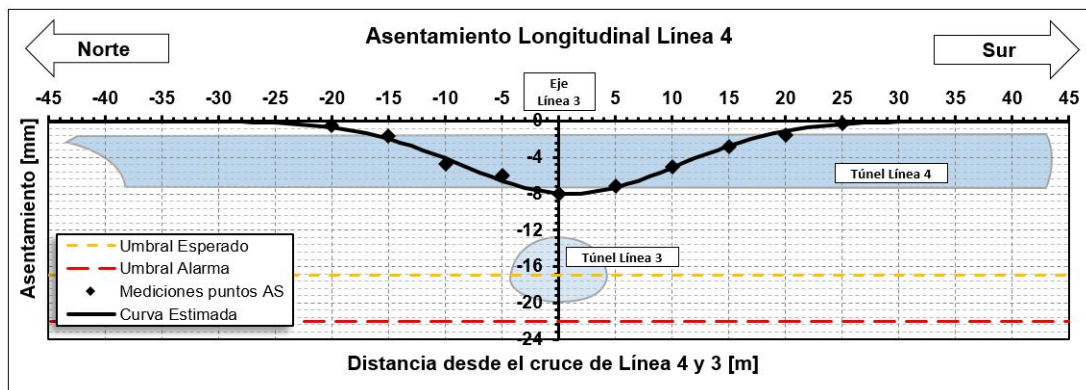


Figura 4.10: Curva de desplazamientos verticales, Estación Plaza Egaña

La siguiente tabla muestra la comparativa entre las estimaciones de asentamientos (Metro. 2013. A) y el desplazamiento real medido.

Tabla 4.5: Desplazamiento vertical real y estimado, estación Plaza Egaña

Asentamiento Real [mm]	Asentamiento Estimado [mm]	Rango de Estimación [mm]	Precisión
8	12	3 - 20	67 %

## Análisis de las precisiones

Es importante mencionar que si bien las estimaciones de asentamientos fueron mayores a las obtenidas mediante medición, en todos los casos (excepto estación Cal y Canto) los asentamientos reales caen dentro de los rangos esperados. Estos últimos se determinaron mediante diferentes métodos de estimación, donde los límites superiores corresponden a análisis en dos dimensiones o de volumen de asientos y los límites inferiores a análisis en tres dimensiones.

La diferencia entre las estimaciones hechas, ya sea por métodos numéricos o por modelaciones teóricas, y las mediciones reales tomadas en terreno se puede deber a variadas razones, entre las que se pueden encontrar:

1. **Parámetros de los suelos:** Las estimaciones se basan en modelos que son determinísticos, los cuales utilizan los parámetros de suelos entregados por la mecánica de suelos. Sin embargo, estos parámetros son fijos y se asume que el suelo tiene condición de isotropía, lo cual no se cumple en la realidad. Por otro lado, las modelaciones en dos y tres dimensiones son sensibles a cambios en los parámetros del suelo, por lo que al modificarlos se generan cambios considerables en las estimaciones de asentamientos. Así, para obtener buenos rangos de variación se recomienda generar estudios más acabados, como se llevó a cabo en el cruce de Universidad de Chile con un estudio de confiabilidad de frente.
2. **Métodos constructivos:** En el diseño de un túnel se determinan métodos constructivos con técnicas y rendimientos para controlar las deformaciones, los cuales en la práctica no se llevan siempre a cabo de manera constante. De esta forma, el desempeño de las técnicas constructivas es otro aspecto que implica incertidumbre e imprecisión en las estimaciones.
3. **Materiales:** Las modelaciones se realizan en función de las propiedades de los materiales de construcción, las cuales tampoco son siempre las informadas por los proveedores y tienen cierto grado de confiabilidad. Así, las variaciones en las propiedades de los materiales provocan inexactitud en las estimaciones.

## 4.2. Asentamientos medidos en superficie

### 4.2.1. Estación Cal y Canto

Una vez obtenidos los registros de asentamiento en superficie, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1.



$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -10 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 8,51^2}\right)$$

La siguiente figura muestra el perfil de asentamientos longitudinales en superficie sobre el cruce de la línea 2.

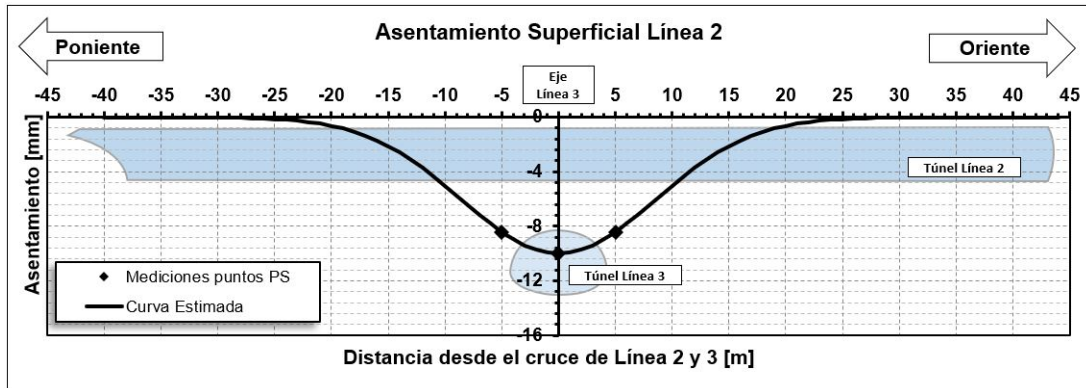


Figura 4.11: Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Cal y Canto

#### 4.2.2. Estación Plaza de Armas

Una vez obtenidos los registros de asentamiento en superficie, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -11 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 14,43^2}\right)$$

La siguiente figura muestra el perfil de asentamientos longitudinales en superficie sobre el cruce de la línea 5.

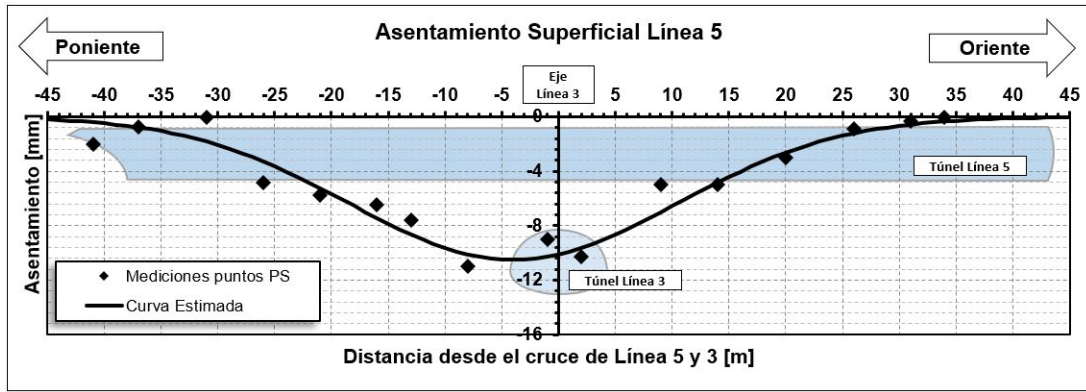


Figura 4.12: Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Plaza de Armas

### 4.2.3. Estación Universidad de Chile

Una vez obtenidos los registros de asentamiento en superficie, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -14,5 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 16,36^2}\right)$$

La siguiente figura muestra el perfil de asentamientos longitudinales en superficie sobre el cruce de la línea 1.

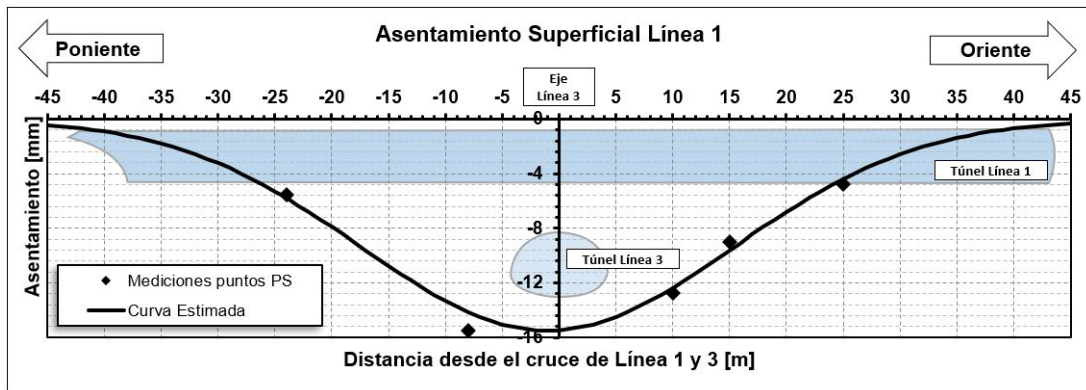


Figura 4.13: Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Universidad de Chile

#### 4.2.4. Estación Irarrázaval

Una vez obtenidos los registros de asentamiento en superficie, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -8,8 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 15,53^2}\right)$$

La siguiente figura muestra el perfil de asentamientos longitudinales en superficie sobre el cruce de la línea 5.

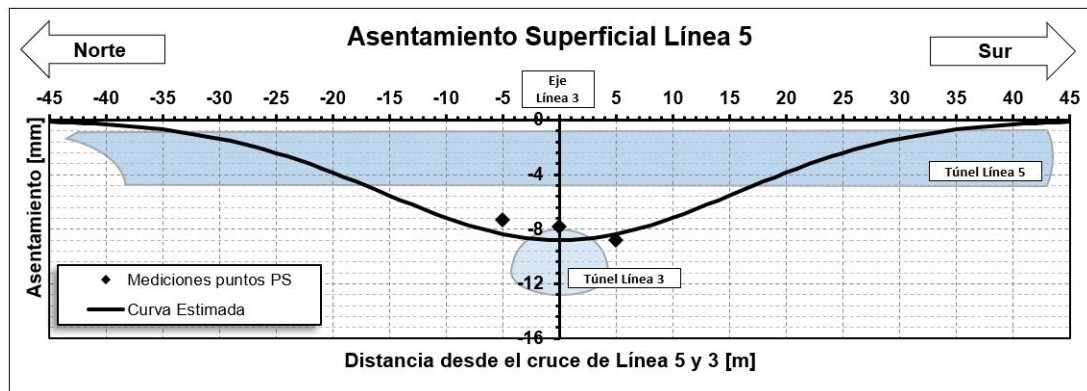


Figura 4.14: Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Irarrázaval

#### 4.2.5. Estación Plaza Egaña

Una vez obtenidos los registros de asentamiento en superficie, se construye el perfil de asentamientos donde el desplazamiento vertical en función de la distancia horizontal desde el eje de la curva se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$S_v(x) = S_{vmax} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) = -11 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 7,92^2}\right)$$

La siguiente figura muestra el perfil de asentamientos longitudinales en superficie sobre el cruce de la línea 4.

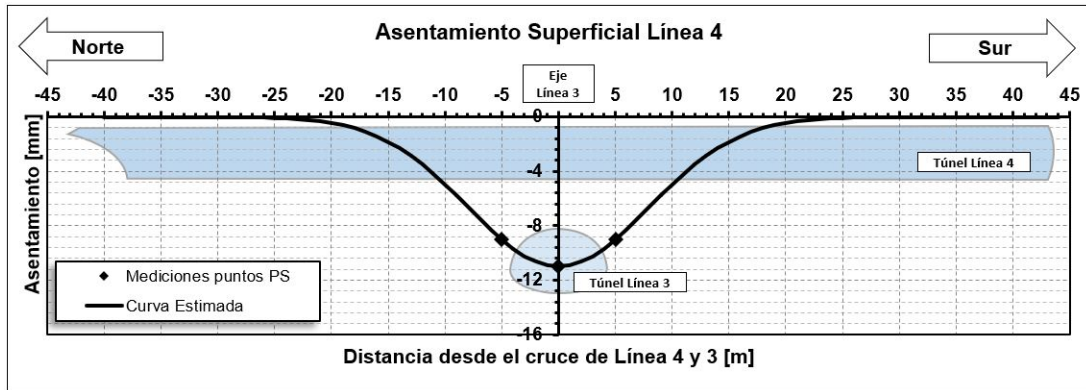


Figura 4.15: Curva de desplazamientos verticales superficiales, Estación Plaza Egaña

### 4.3. Obtención de parámetros

#### 4.3.1. Punto de inflexión

La curva de asentamientos debe representar fielmente la disposición de los puntos medidos en terreno. A su vez, la forma de la curva depende directamente de la magnitud del ancho de asentamiento. Así, se debe buscar un valor para  $i$  tal que se genere una curva lo más cercana posible a los puntos medidos.

Para obtener el valor de  $i$  se calculará el *Error Cuadrático Medio (ECM)*, el cual corresponde a un estimador estadístico que calcula el promedio de los errores mediante la ecuación:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (4.1)$$

Donde:

- $n$ : Tamaño muestral
- $\hat{Y}$ : Vector de  $n$  predicciones (Valores estimados)
- $Y$ : Vector de valores verdaderos (Valores medidos)

De esta forma, la metodología para obtener el valor de  $i$  es la siguiente:

1. Construir curva con valor arbitrario de  $i$
2. Calcular el ECM utilizando los valores de la curva y los valores medidos
3. Utilizar la función *Búsqueda de Objetivo* de *Excel*. El software buscará valores de  $i$  tal que se minimice el ECM

Utilizando la metodología anterior, los valores obtenidos para el ancho de asentamiento son los siguientes:

Tabla 4.6: Valores calculados para el parámetro  $i$

Estación de cruce	$i_z$ [m]	$i_0$ [m]
Cal y Canto	10,26	8,51
Plaza de Armas	15,53	14,43
Universidad de Chile	19,60	16,36
Irarrázaval	16,16	15,53
Plaza Egaña	9,56	7,92

En la tabla 4.6,  $i_z$  corresponde al ancho de asentamiento en profundidad e  $i_0$  en superficie.

### 4.3.2. Volúmenes de asiento

Una vez obtenidos los asentamientos máximos y el parámetro  $i$ , es posible calcular los volúmenes de asiento mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3.

Las siguientes tablas muestran los volúmenes obtenidos para cada intersección, considerando las mediciones en profundidad y en superficie.

Tabla 4.7: Volúmenes de asiento calculados para cada estación a partir de mediciones en profundidad

Estación de cruce	$V_s$ [ $m^3/m$ ]	$V_l$ [%]
Cal y Canto	0,21	0,12
Plaza de Armas	0,58	0,31
Universidad de Chile	0,64	0,34
Irarrázaval	0,36	0,21
Plaza Egaña	0,19	0,28

Tabla 4.8: Volúmenes de asiento calculados para cada estación a partir de mediciones en superficie

Estación de cruce	$V_s$ [ $m^3/m$ ]	$V_l$ [%]
Cal y Canto	0,21	0,12
Plaza de Armas	0,40	0,21
Universidad de Chile	0,59	0,31
Irarrázaval	0,34	0,20
Plaza Egaña	0,22	0,32

### 4.3.3. Resumen de Parámetros

La siguiente tabla muestra el resumen de los parámetros obtenidos para los 5 casos de estudio, los cuales servirán para el análisis posterior.

Tabla 4.9: Resumen de parámetros obtenidos

	<b>Estación de cruce</b>	$\delta_{max}$ [mm]	i [m]	$V_s$ [ $m^3/m$ ]	$V_l$ [%]
<b>Profundidad</b>	Cal y Canto	8,2	10,26	0,21	0,12
	Plaza de Armas	15,0	15,53	0,58	0,31
	Universidad de Chile	13,0	19,60	0,64	0,34
	Irarrázaval	8,8	16,16	0,36	0,21
	Plaza Egaña	8,0	9,56	0,19	0,28
<b>Superficie</b>	Cal y Canto	10,0	8,51	0,21	0,12
	Plaza de Armas	11,0	14,43	0,40	0,21
	Universidad de Chile	14,5	16,36	0,59	0,31
	Irarrázaval	8,8	15,53	0,34	0,20
	Plaza Egaña	11,0	7,92	0,22	0,32

# Capítulo 5

## Magnitudes Físicas de Túneles y Suelos

En el presente capítulo se realiza una revisión de planos y esquemas disponibles para extraer todas las dimensiones de los túneles y las propiedades de los suelos, necesarios para realizar los análisis posteriores.

Primeramente, se analizan los planos longitudinales de la línea 3 para obtener las profundidades de ambos túneles y áreas transversales de los túneles superiores.

Posteriormente, se analizan los planos en planta para obtener los anchos de los túneles e identificar los puntos donde ambas líneas se intersecan.

A continuación, se obtienen las áreas transversales de los túneles de línea 3 a través de los planos y monografías disponibles.

Para el caso de los suelos, se estudian las estratigrafías de cada cruce y el informe de mecánica de suelos para con ello obtener todos los parámetros para caracterizar los suelos (Anexos A y B)

Finalmente, se grafican las propiedades del suelo y los túneles con respecto a los asentamientos, para con ello evaluar la dependencia de las subsidencias en el diseño de los túneles.

## 5.1. Planos Longitudinales

A continuación, se muestran las secciones de perfil longitudinal de la línea 3 en los puntos de cruce con las líneas existentes. En ellas se muestran las magnitudes de las profundidades en la clave y en el fondo de ambos túneles.

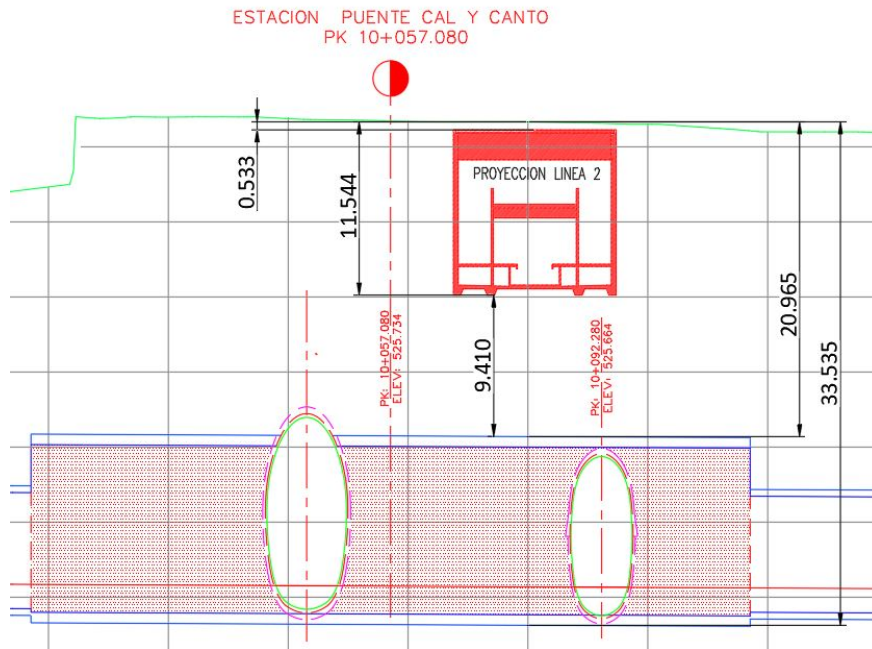


Figura 5.1: Perfil estación Cal y Canto

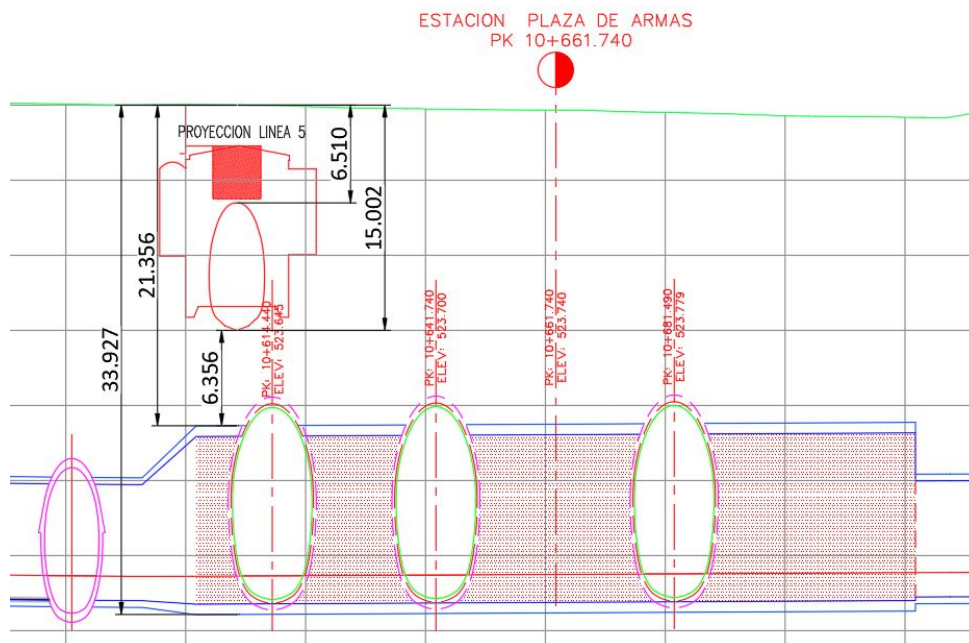


Figura 5.2: Perfil estación Plaza de Armas



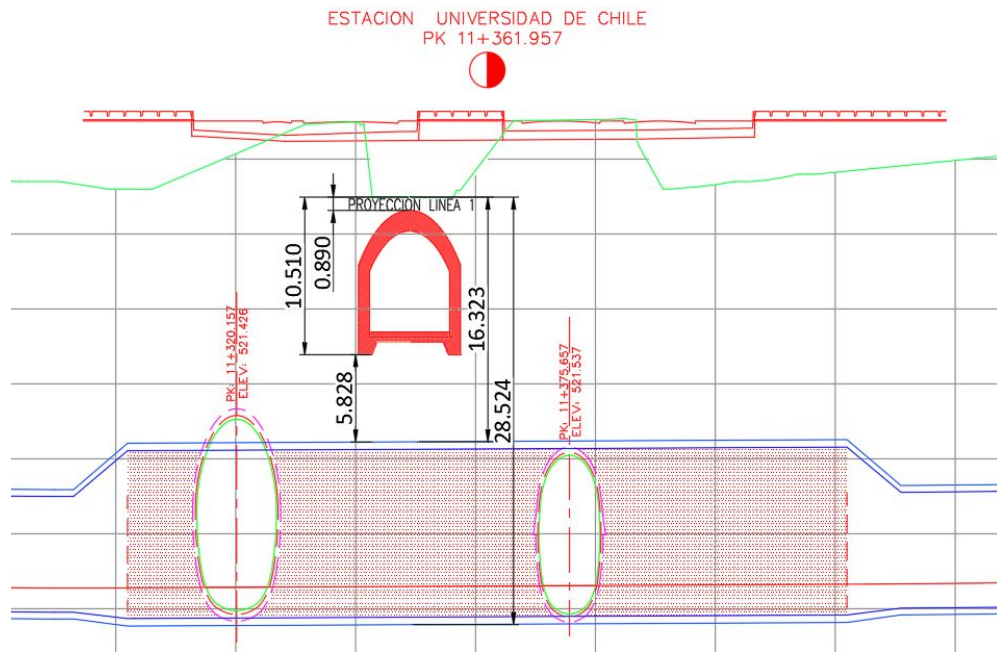


Figura 5.3: Perfil estación Universidad de Chile

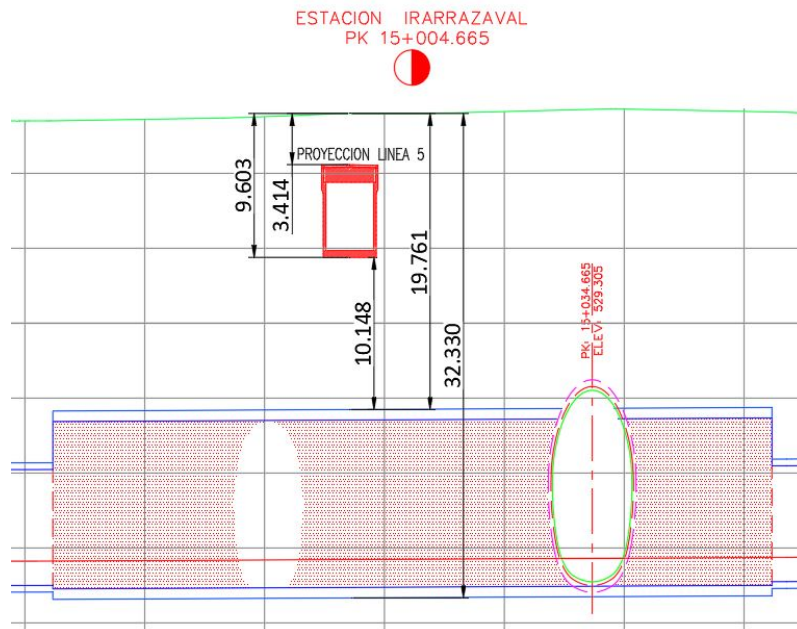


Figura 5.4: Perfil estación Irarrázaval

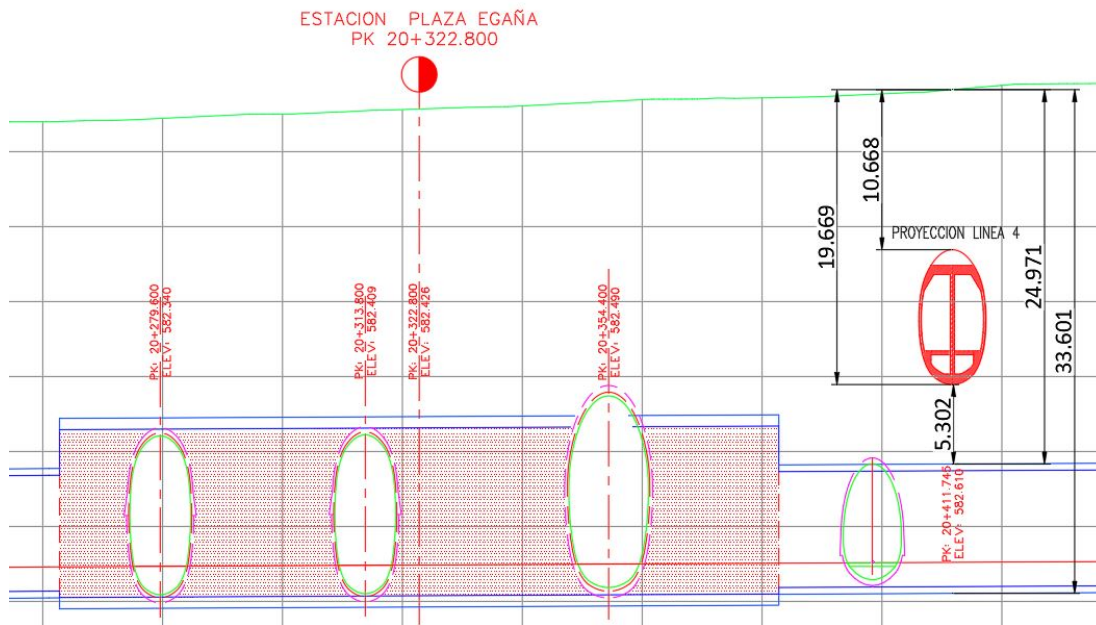


Figura 5.5: Perfil estación Plaza Egaña

## 5.2. Planos en Planta

A continuación se muestran las secciones de planos en planta de la línea 3 en los puntos de cruce con las líneas existentes. En ellas se muestran las magnitudes de los anchos de ambos túneles.

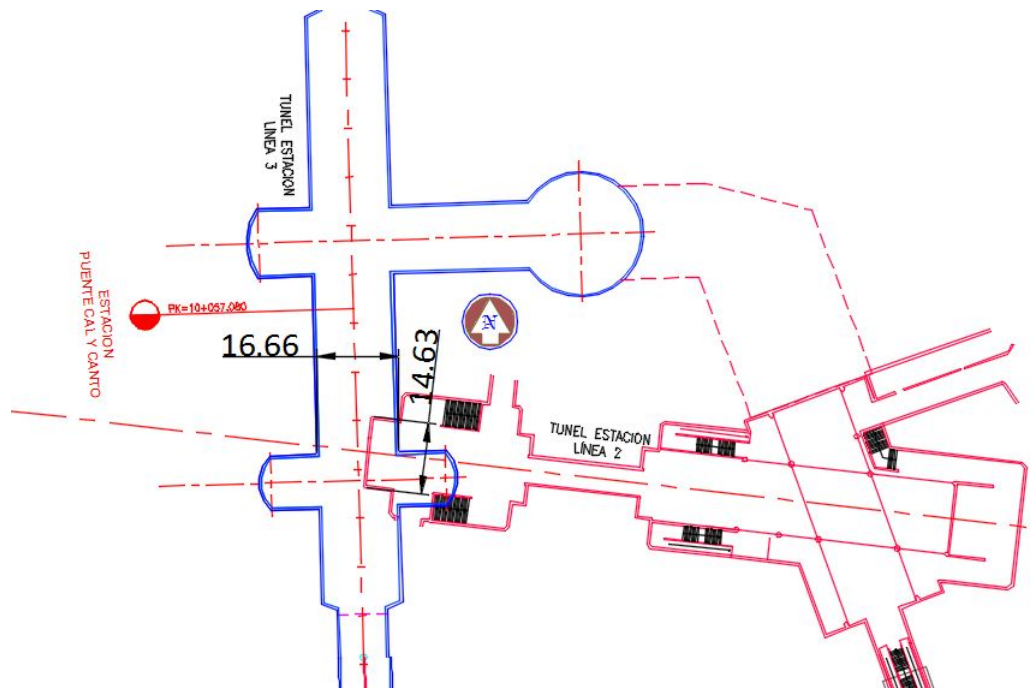


Figura 5.6: Planta estación Cal y Canto

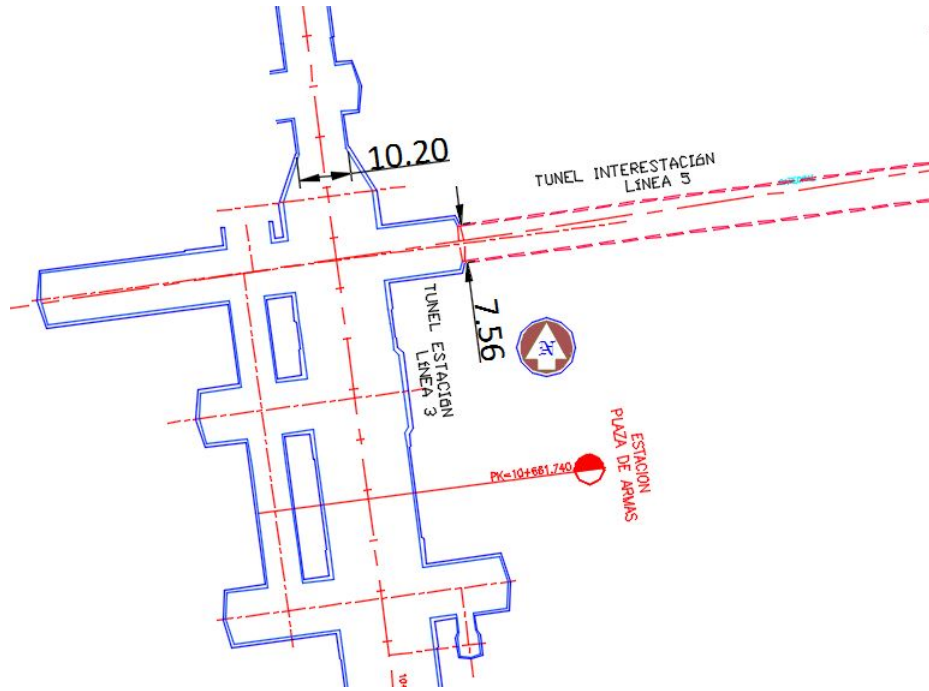


Figura 5.7: Planta estación Plaza de Armas

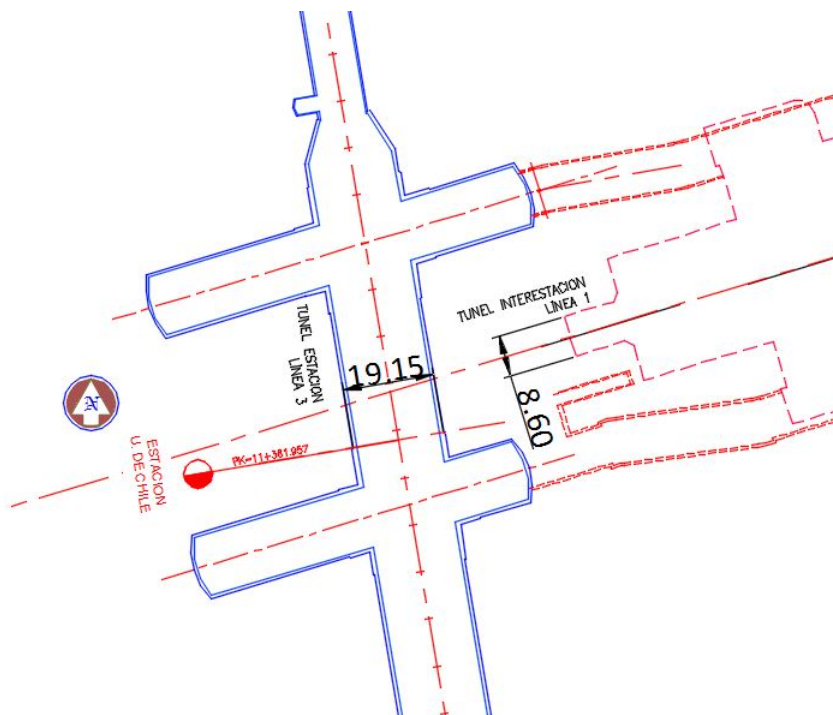


Figura 5.8: Planta estación Universidad de Chile

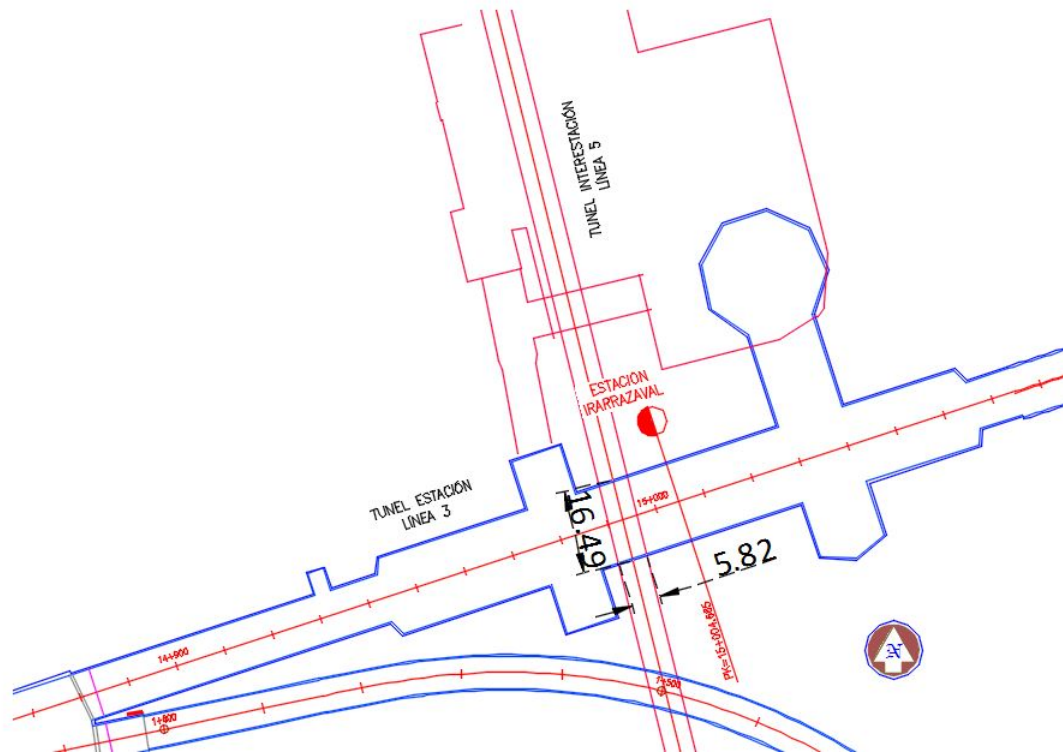


Figura 5.9: Planta estación Irarrázaval

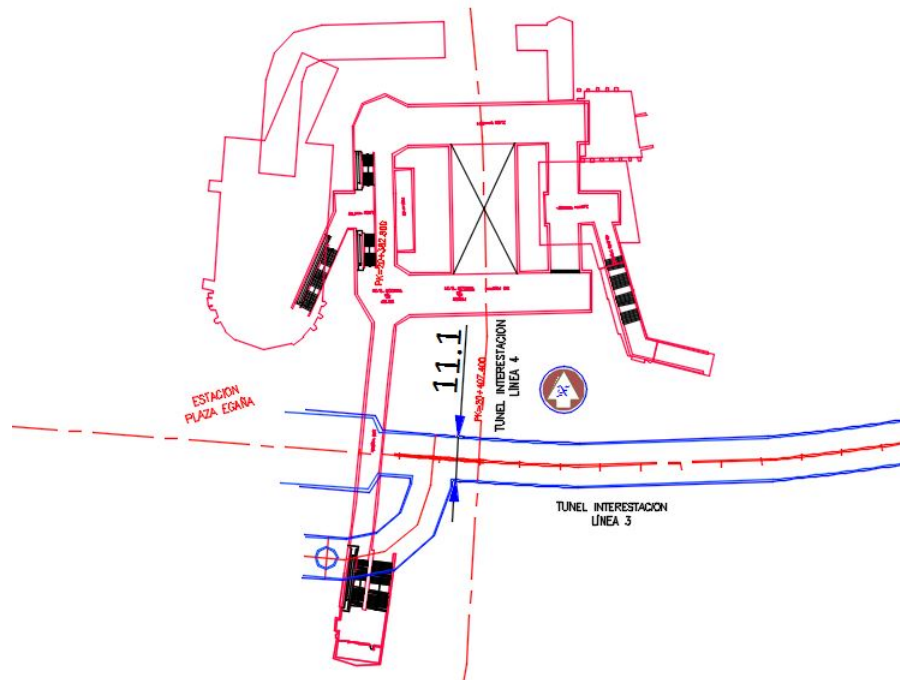


Figura 5.10: Planta estación Plaza Egaña

### 5.3. Planos Transversales Túneles Línea 3

A continuación, se muestran las secciones transversales de los túneles estación de la línea 3, para las 5 estaciones de estudio.

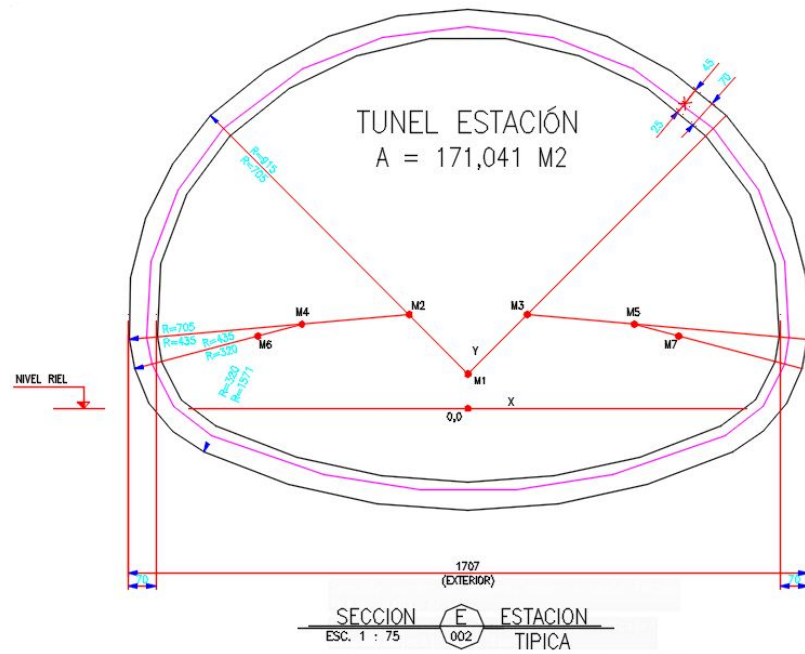


Figura 5.11: Sección transversal estación Cal y Canto

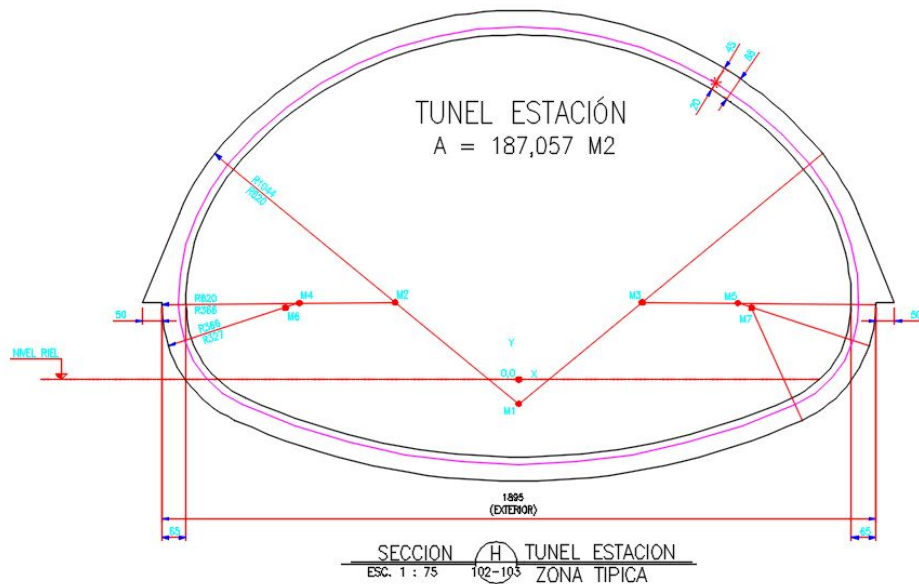


Figura 5.12: Sección transversal Plaza de Armas



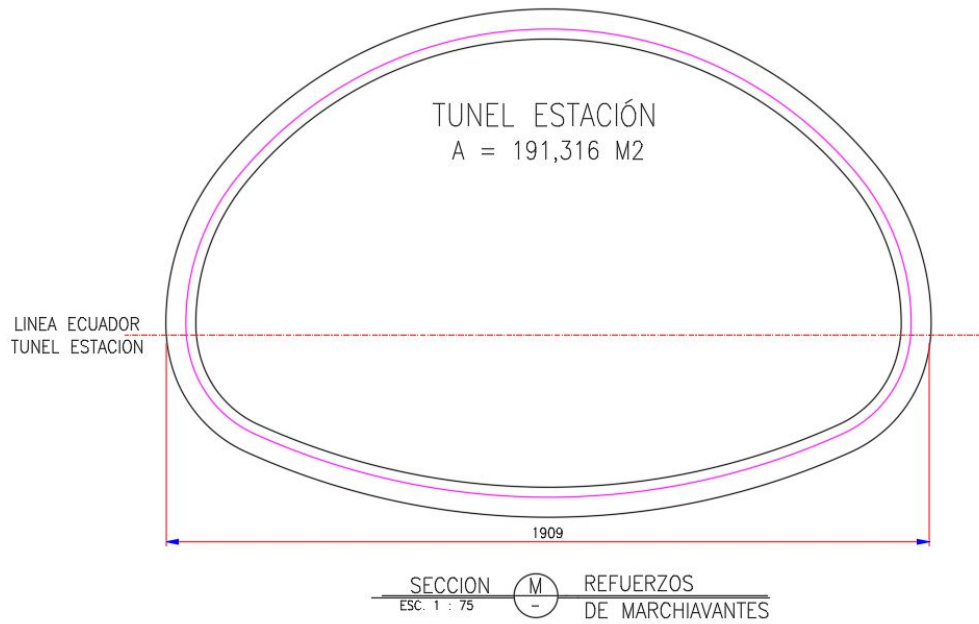


Figura 5.13: Sección transversal estación Universidad de Chile  
5

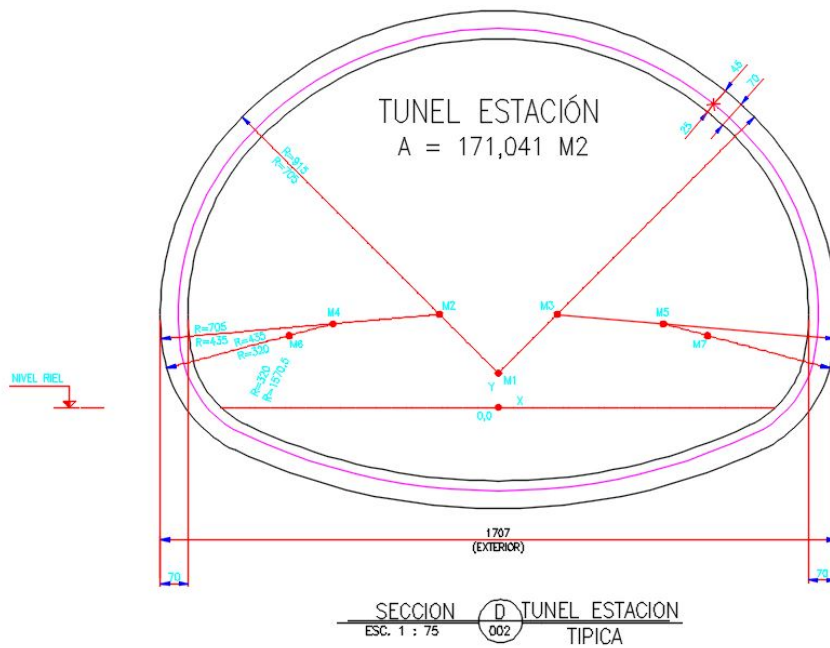


Figura 5.14: Sección transversal estación Irarrázaval

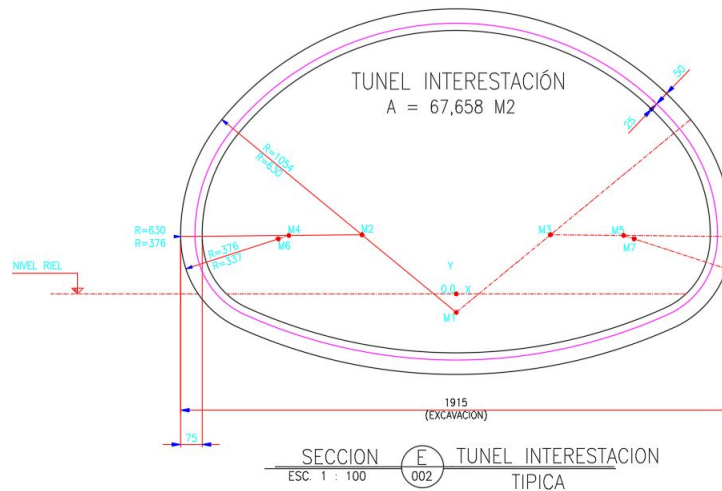


Figura 5.15: Sección transversal estación Plaza Egaña

## 5.4. Propiedades de los Suelos

De acuerdo a las estratigrafías as-built (Anexo A) y los resultados del informe de mecánica de suelos (Anexo B) se puede notar que 4 de los 5 casos de estudio se componen principalmente de grava de Santiago, mientras que el quinto (Estación Plaza Egaña) se trata de un perfil con combinación de deposiciones de grava de Santiago y finos de cono de deyección, lo que a priori provocaría comportamientos diferentes en cuanto a las deformaciones producto de la excavación de los túneles.

Las tablas 5.1 y 5.2 muestran un resumen de los parámetros de los suelos de grava de Santiago y finos de cono de deyección.

## 5.5. Resumen de Parámetros

La figura 5.16 corresponde a un esquema general de los perfiles en profundidad de los túneles en el cual se indica la notación que se utilizará para las dimensiones de ambos túneles y de los suelos.

La tabla 5.3 muestra un resumen de las magnitudes físicas de los túneles y los suelos para los 5 casos de estudio.

Los diámetros equivalentes para los túneles en estudio, calculados mediante la ecuación 2.4 se muestran en la tabla 5.4.

La tabla 5.5 muestra un resumen de las principales propiedades de los túneles y del suelo.

Tabla 5.1: Propiedades Geotécnicas Gravas de Santiago (Metro. 2014. B)

Parámetro	Simbología	Unidades	Profundidad [m]	Valor
Peso Unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>		18,5
Módulo de Deformación	$E$	kPa	todo Z	20.000 + 2.750 Z z en metros
Módulo de Deformación en Descarga y Recarga	$E_D$	kPa	todo Z	2E
Módulo de Poisson	$\nu$	[-]	todo Z	0,30
Coeficiente de Empuje en Reposo	$K_0$	[-]	$Z \leq 12$	0,65
			$Z < 12$	0,45
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	todo Z	31
Cohesión	$c$	kPa	$Z \leq 10$	30
			$Z > 10$	55
Ángulo de Dilatancia	$\psi$	$\gamma$	todo Z	0

Tabla 5.2: Propiedades Geotécnicas Finos del Norte y Cono de Deyección (Metro. 2014. B)

Parámetro	Simbología	Unidades	Profundidad [m]	Valor
Peso Unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>		22,5
Módulo de Deformación	$E$	kPa	$Z \leq 6,5$	46.000 + Z <sup>0,55</sup> z en metros
			$Z > 6,5$	66.000 + Z <sup>0,55</sup> z en metros
Módulo de Deformación en Descarga y Recarga	$E_D$	kPa	todo Z	2E
Módulo de Poisson	$\nu$	[-]	todo Z	0,25
Coeficiente de Empuje en Reposo	$K_0$	[-]	$6 < Z \leq 24$	0,9 - 0,0356 (Z - 6) con Z en metros
			$Z > 24$	0,26
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	$Z \leq 6,5$	53 - 45
			$Z > 6,5$	53 - 45
Cohesión	$c$	kPa	$Z \leq 6,5$	12,5 - 20
			$Z > 6,5$	21,5 - 35
Ángulo de Dilatancia	$\psi$	$\gamma$	todo Z	12



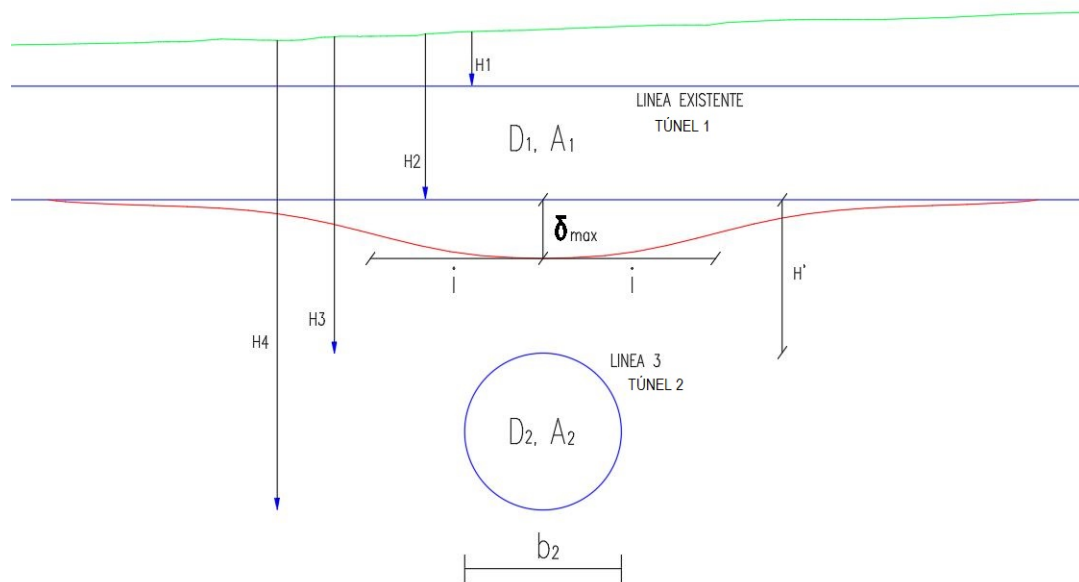


Figura 5.16: Esquema general de la disposición de los túneles en zonas de cruce de líneas.

Tabla 5.3: Resumen dimensiones de los túneles

Estación de Cruce	H <sub>1</sub> [m]	H <sub>2</sub> [m]	H <sub>3</sub> [m]	H' [m]	H <sub>4</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	Área Transversal Túnel 1 [m <sup>2</sup> ]	Área Transversal Túnel 2 [m <sup>2</sup> ]
Cal y Canto	0,524	11,535	20,958	9,423	33,528	20,958	297,350	171,041
Plaza de Armas	6,512	15,002	21,358	6,357	33,928	18,858	63,420	187,057
Universidad de Chile	0,890	10,510	16,325	5,815	28,525	15,325	144,300	191,316
Irarrázaval	3,414	9,604	19,761	10,158	32,331	18,761	55,490	171,041
Plaza Egaña	10,679	19,669	24,971	5,302	33,601	18,971	81,290	67,658

Tabla 5.4: Diámetros equivalentes

Estación de Cruce	D <sub>1</sub> [m]	D <sub>2</sub> [m]
Cal y Canto	19,46	14,76
Plaza de Armas	8,99	15,43
Universidad de Chile	13,55	15,51
Irarrázaval	8,41	14,76
Plaza Egaña	10,17	9,28

Tabla 5.5: Resumen propiedades físicas de túneles y suelos

Estación de cruce	H <sub>1</sub> [m]	H <sub>2</sub> [m]	H <sub>3</sub> [m]	H' [m]	H <sub>4</sub> [m]	D <sub>1</sub> [m]	D <sub>2</sub> [m]	b <sub>2</sub> [m]	Peso Unitario [kN/m <sup>3</sup> ]	Ángulo de Fricción [°]	c [kPa]	v [-]	E [kPa]
Cal y Canto	0,524	11,535	20,958	9,423	33,528	19,458	14,757	16,67	23,0	45	35	0,25	406382
Plaza de Armas	6,512	15,002	21,358	6,357	33,928	8,986	15,433	10,20	23,0	45	35	0,25	409656
Universidad de Chile	0,890	10,510	16,325	5,815	28,525	13,555	15,513	19,75	23,0	45	35	0,25	365128
Irarrázaval	3,414	9,604	19,761	10,158	32,331	8,405	14,757	16,45	23,0	45	35	0,25	396464
Plaza Egaña	10,679	19,669	24,971	5,302	33,601	10,174	9,281	11,10	18,5	31	50	0,30	422869

## 5.6. Correlación de Parámetros

A modo de evaluar las posibles dependencias de los asentamientos máximos de los túneles con respecto a las propiedades físicas de ellos, se grafican estas subsidencias en función de magnitudes combinadas.

La figura 5.17 muestra la dependencia del parámetro  $i$  con respecto a la profundidad del túnel para los casos de grava de Santiago, normalizando por los diámetros equivalentes de cada uno.

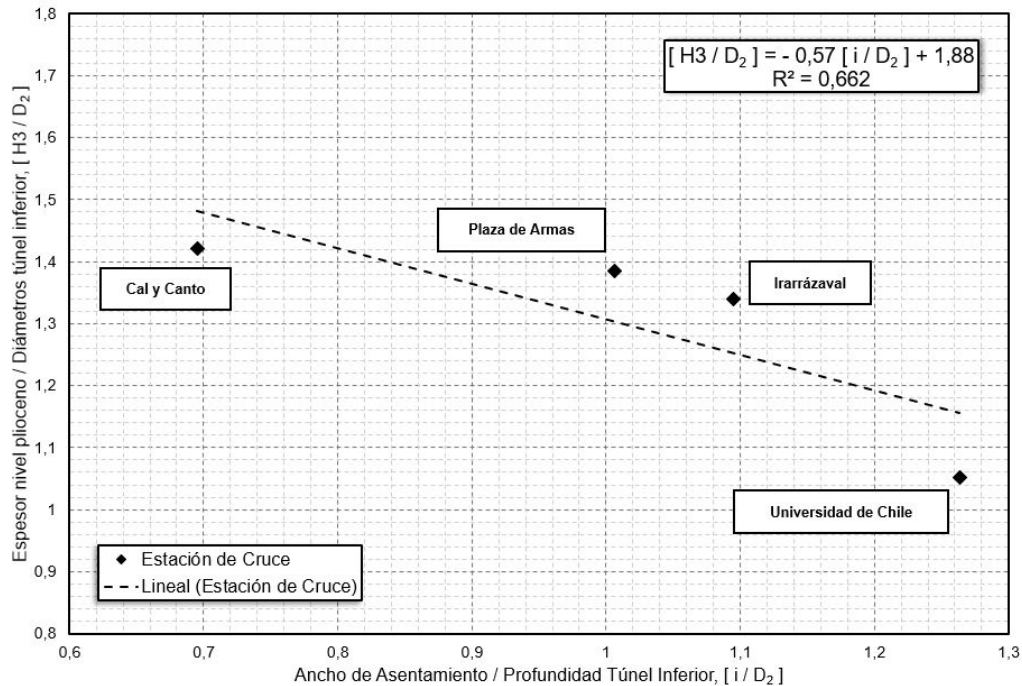


Figura 5.17: Parámetro  $i$  respecto a la profundidad del túnel

La regresión lineal del gráfico de la figura 5.17 muestra una correlación baja, lo que indicaría que no existe una relación directa entre el parámetro  $i$  y la profundidad del túnel. Peck (1969) y autores posteriores postularon la dependencia entre estos parámetros discriminando según los tipos de suelo, tal como se hace en este gráfico, donde solo se consideran los cruces con suelo de gravas de Santiago. Así, la baja correlación podría deberse a diferencias en los métodos constructivos de las líneas existentes, donde las estaciones Cal y Canto y Universidad de Chile se excavan a tajo abierto, mientras que para la línea 5 (estaciones Plaza de Armas e Irarrázaval) se utilizó el método NATM. Lo anterior provoca que el acomodamiento de las partículas y los esfuerzos generados sean distintos para ambos casos, lo que podría generar una diferencia en la ocurrencia de movimientos verticales y horizontales por efecto de la nueva excavación.

Sin embargo, se puede evaluar la misma dependencia trabajando con la profundidad de niveles terciarios (figura 5.18), tal como se lleva a cabo en el modelo de Madrid (Oteo et al, 1999).

En el caso de la figura 5.18 se obtiene un coeficiente de correlación mucho mayor al de la figura 5.17, por lo que la curva obtenida podría llegar utilizarse para estimar el parámetro  $i$  en gravas de Santiago. Sin embargo, para ello es necesario calibrar la curva con mayor información.

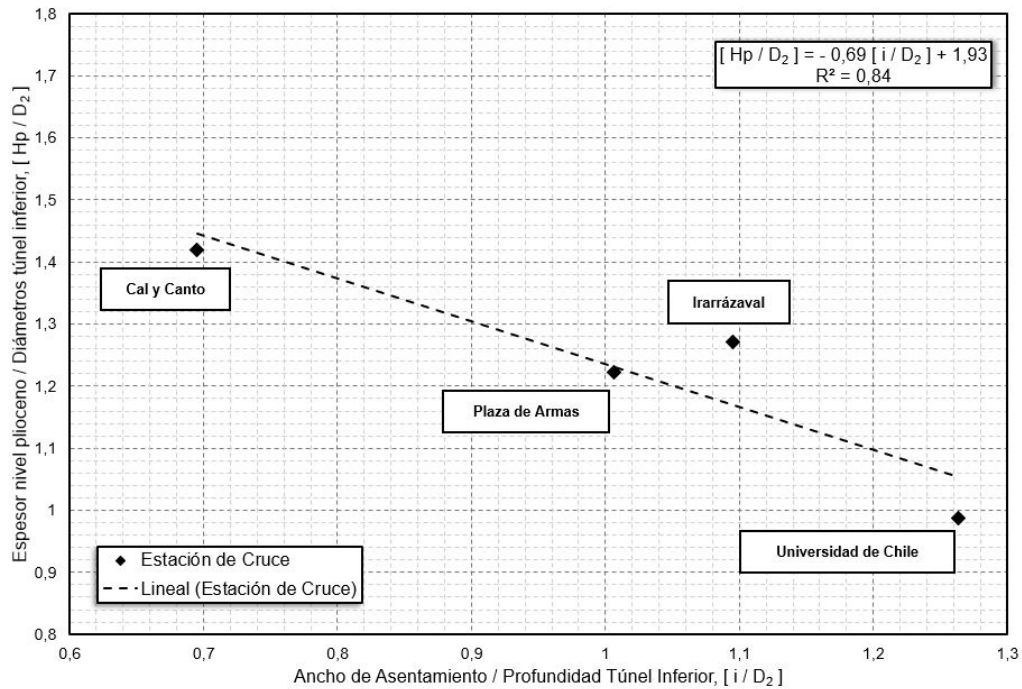


Figura 5.18: Parámetro  $i$  respecto a la profundidad de suelos rígidos

Por otro lado, la figura 5.19 muestra la correlación entre asentamiento máximo, ancho de asentamiento, diámetro de túnel superior y ancho de túnel inferior.

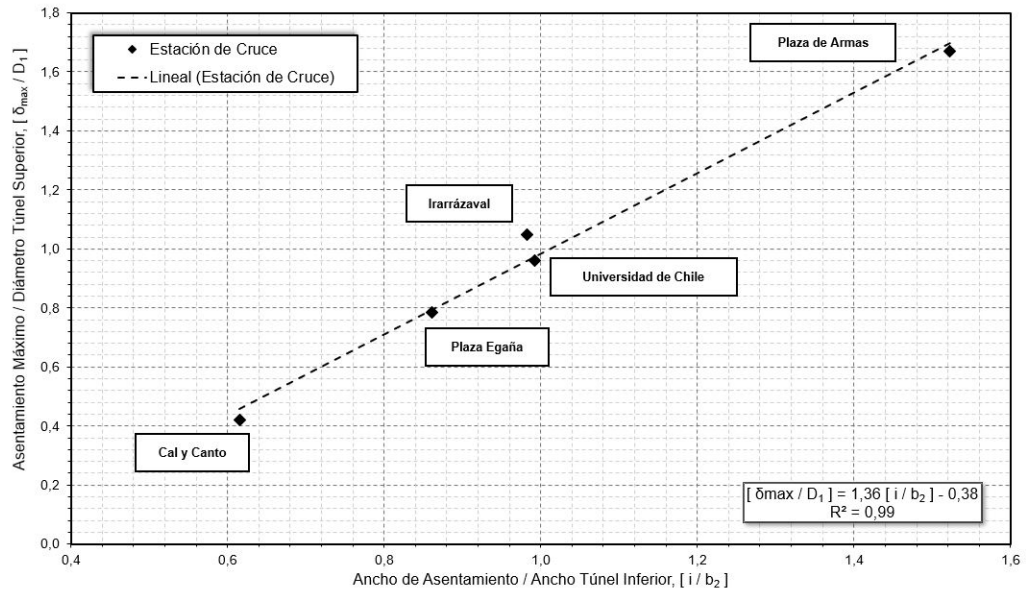


Figura 5.19: Gráfico  $i/b_2$  vs.  $\delta_{max}/D_1$

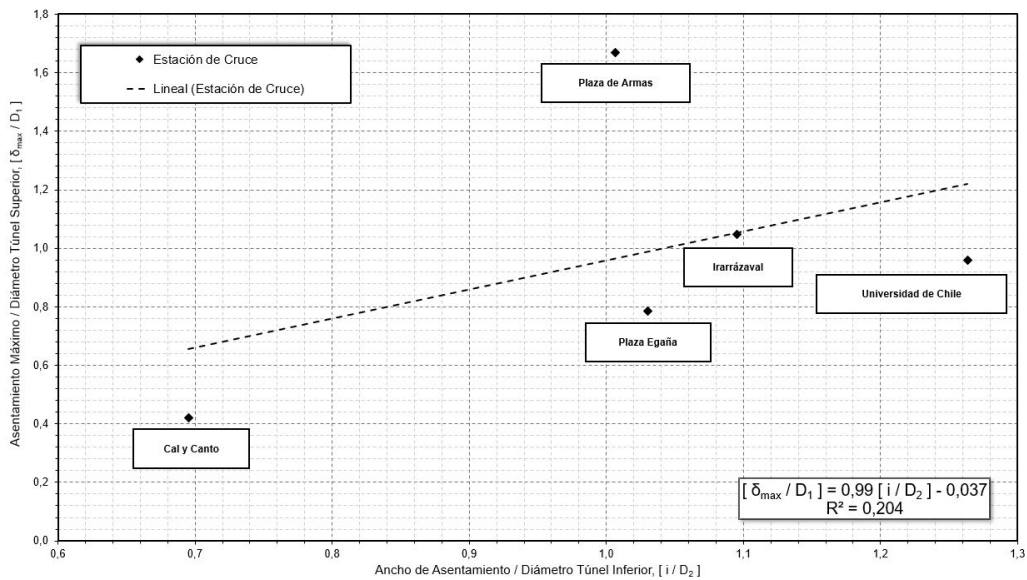


Figura 5.20: Gráfico  $i/b_2$  vs.  $\delta_{max}/D_1$

El gráfico de la figura 5.19 muestra una relación entre los asentamientos máximos en la línea existente en función de las dimensiones de los túneles y el parámetro  $i$ . Con este gráfico es posible despejar asentamientos máximos para gravas de Santiago mediante las siguientes relaciones:

$$i = -\frac{Hp - 1,93 \cdot D_2}{0,69} \quad (5.1)$$

$$S_{vmax}(x) = -1,36D_1 \left( \frac{Hp - 1,93 \cdot D_2}{0,69 \cdot b_2} + 0,28D_1 \right) \quad (5.2)$$

## Capítulo 6

# Aplicación de la Teoría de Deformaciones

En este capítulo se analiza la aplicabilidad del Nuevo Modelo de Madrid en los suelos de Santiago y la construcción de la línea 3 del Metro.

Primeramente, se obtienen los valores de espesor de los niveles terciarios sobre la clave ( $H_p$ ) para los 5 casos de análisis. Para ello se utilizarán los perfiles estratigráficos as-built preparados por el Consorcio AWWA, junto con los planos de perfiles longitudinales y transversales.

Finalmente, se grafican los volúmenes obtenidos anteriormente en función del recubrimiento terciario relativo para obtener la ley de variación que los rige. Así, se compara con las leyes de variación provenientes del Nuevo Modelo de Madrid, para con ello evaluar la aplicación del modelo en los suelos estudiados.

## 6.1. Obtención de alturas de niveles pliocénicos

A continuación, se muestran porciones de los perfiles estratigráficos de las 5 zonas a analizar, en las cuales se indica el nivel de la clave del túnel inferior.

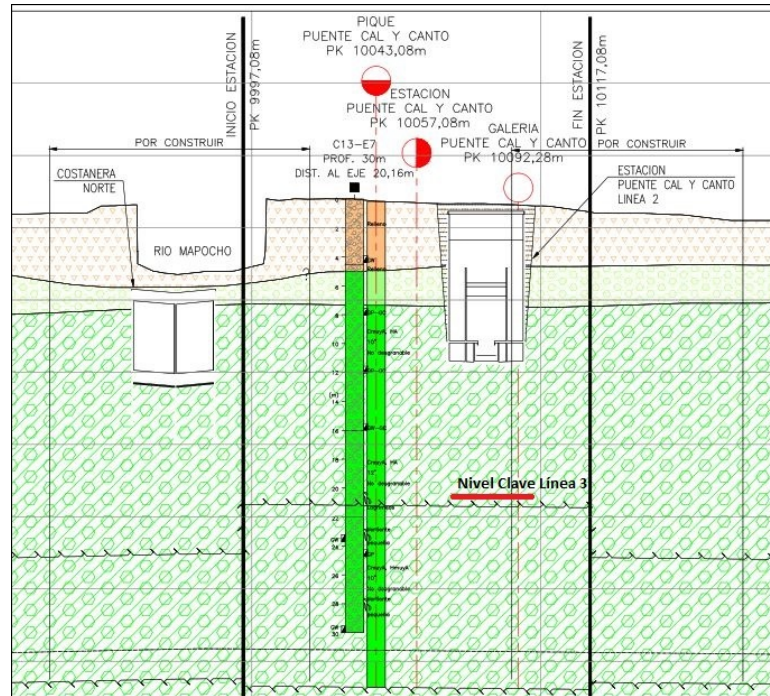


Figura 6.1: Nivel de la clave del túnel inferior, estación Cal y Canto

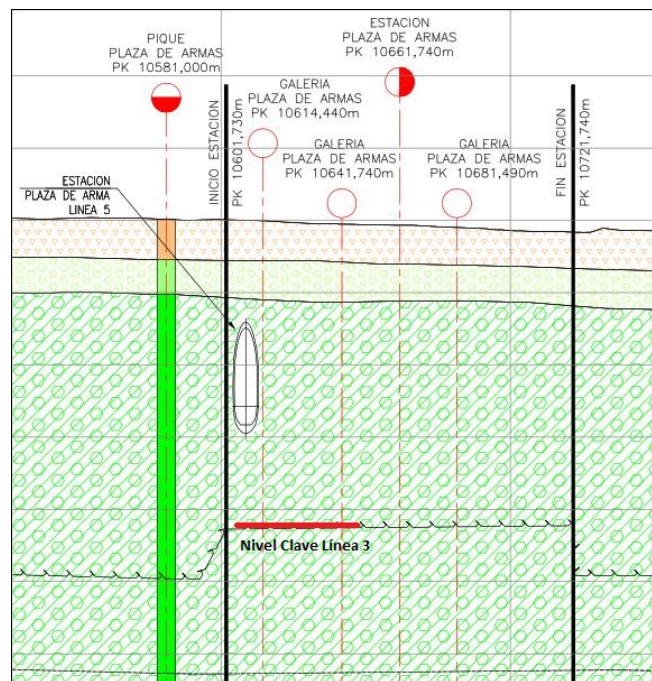


Figura 6.2: Nivel de la clave del túnel inferior, estación Plaza de Armas





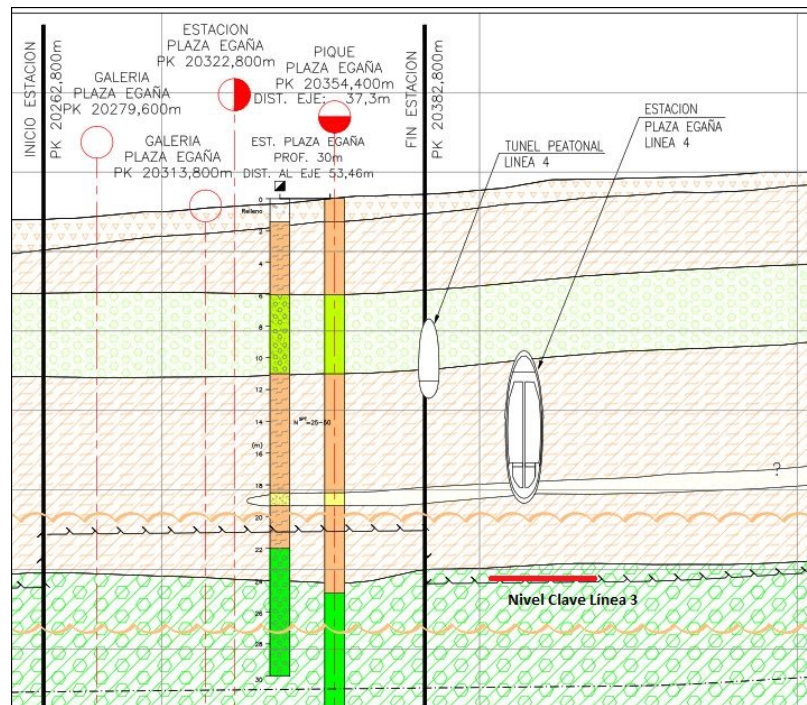


Figura 6.5: Nivel de la clave del túnel inferior, estación Plaza Egaña

La tabla 6.1 muestra un resumen con los valores de espesor de los niveles terciarios sobre la clave ( $H_p$ ). Además, se muestra la cobertura relativa y el porcentaje de volumen de asientos para cada caso.

Tabla 6.1: Espesores de niveles pliocenos sobre la clave del túnel Línea 3

Intersección	$H_p$ [m]	D [m]	$H_p/D$	$V_s$ [%]
Cal y Canto	20,9	14,8	1,42	0,12
Plaza de Armas	18,8	15,4	1,22	0,32
Universidad de Chile	15,3	15,5	0,99	0,34
Irarrázaval	18,7	14,8	1,27	0,21
Plaza Egaña	18,9	9,3	2,04	0,30

## 6.2. Análisis de registros en profundidad

### 6.2.1. Volúmenes de asientos

Relacionando el recubrimiento relativo superior versus el volumen de asientos porcentual para los registros en profundidad se obtiene el gráfico de la figura 6.6. En ella, se realiza un ajuste logarítmico de los casos de estudio sin considerar el cruce de estación Plaza Egaña debido a su notorio comportamiento diferente.



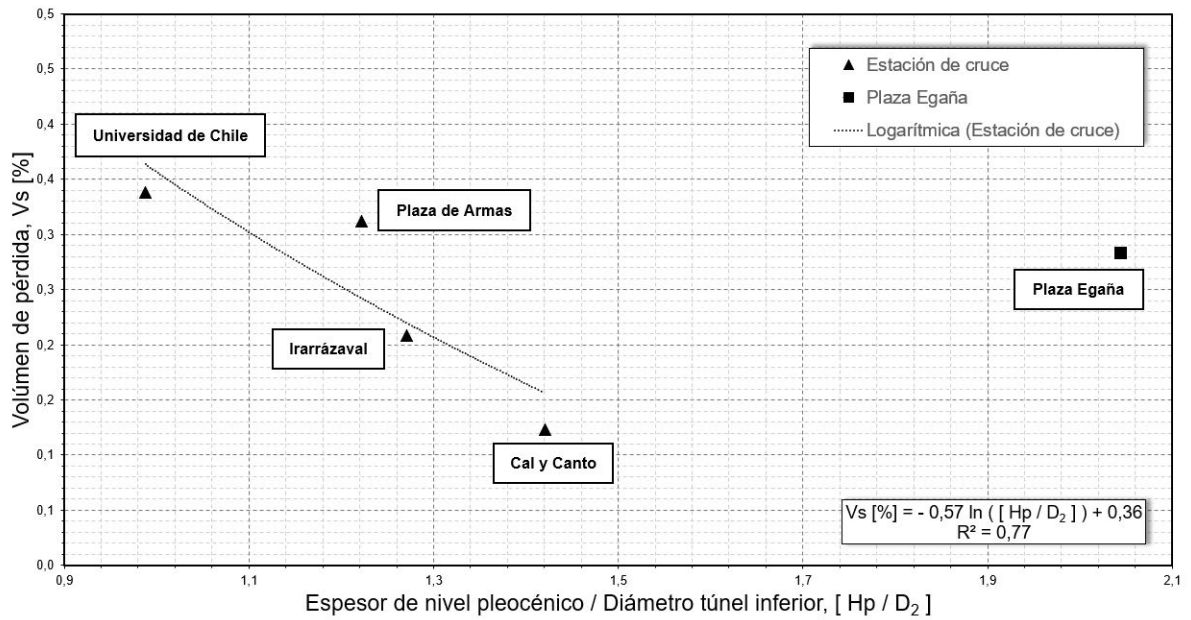


Figura 6.6: Variación de volumen de asientos (en profundidad) en función de  $H_p/D_2$

Posteriormente, se grafica el ajuste logarítmico obtenido en la figura 6.6, y se contrasta con la ley propuesta por Díez (2010).

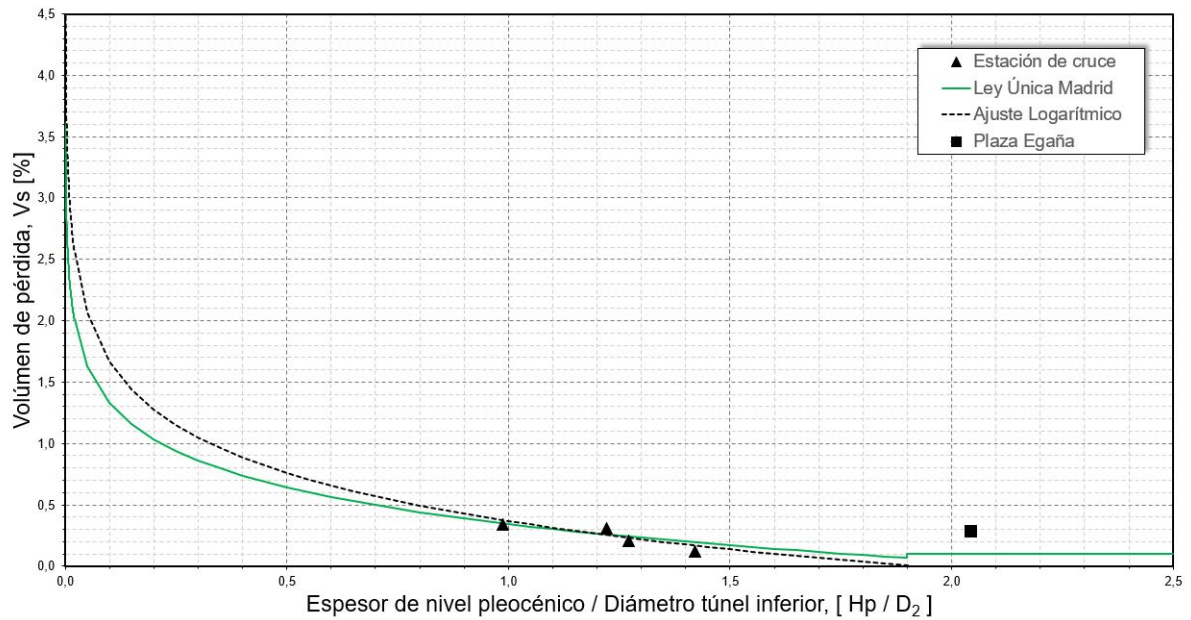


Figura 6.7: Ley de asientos obtenida (en profundidad) en función de  $H_p/D_2$ , contrastada con ley propuesta por Díez (2010)

Comparando el ajuste con el criterio de recubrimiento total  $H_t < 2$  (figura 2.1) se obtiene el gráfico de la figura 6.8.

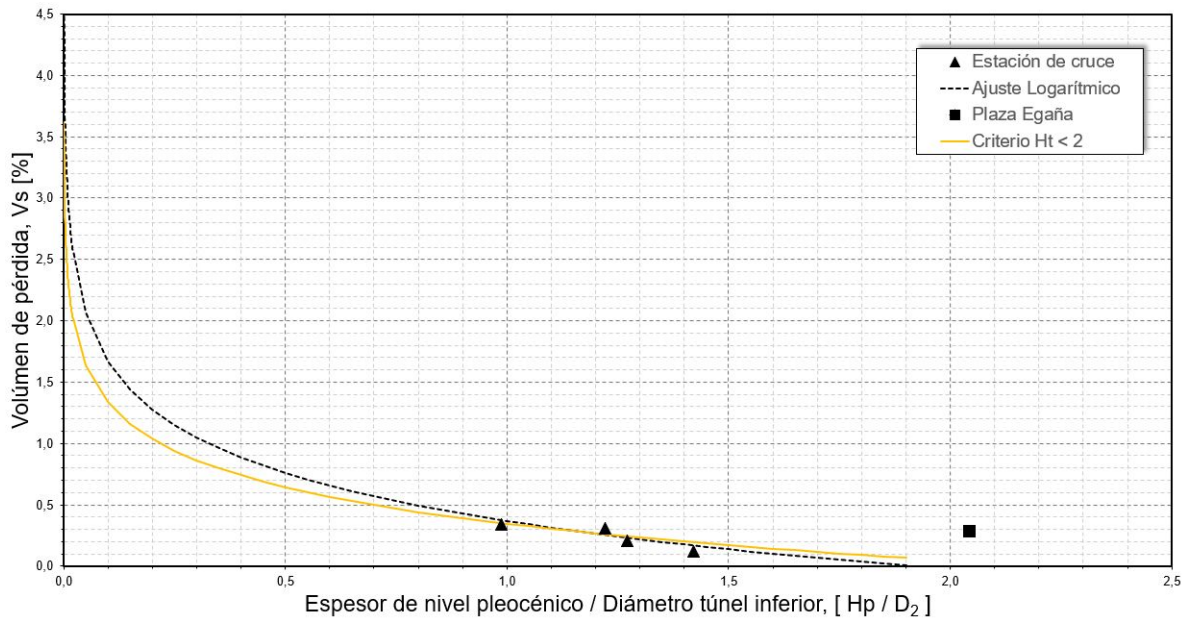


Figura 6.8: Ley de asientos obtenida (en profundidad) en función de  $H_p/D_2$ , contrastada con criterio de recubrimiento total, Díez (2010)

A modo de evaluar cuál de los dos criterios se asemeja más al ajuste logarítmico realizado con los volúmenes calculados, se calcula el *ECM*, el cual se muestra en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Cálculo de *ECM* entre la curva de ajuste (caso en profundidad) y las leyes de asiento propuestas por Díez (2010)

	Ley Única	Criterio Ht <2
<b>ECM</b>	0,251	0,246

Al gráfico de la figura 6.7 se le aplican las envolventes máximas y mínimas propuestas por Díez (2010) para evaluar su aplicación a los casos de estudio figura 6.6.

La tabla 6.3 muestra los valores de volumen de asientos reales y obtenidos mediante ajustes y leyes del Nuevo Modelo de Madrid.

Tabla 6.3: Volumen de asientos (en profundidad) reales y obtenidos mediante ajustes

Estación de cruce	$V_s$ [%]			
	Real	Ajuste	Muestra Ht <2	Ley única
Cal y Canto	0,123	0,200	0,194	0,193
Plaza de Armas	0,312	0,213	0,259	0,257
Universidad de Chile	0,338	0,350	0,350	0,348
Irrázaval	0,208	0,230	0,242	0,240
Plaza Egaña	0,283	0,019	0,037	0,036

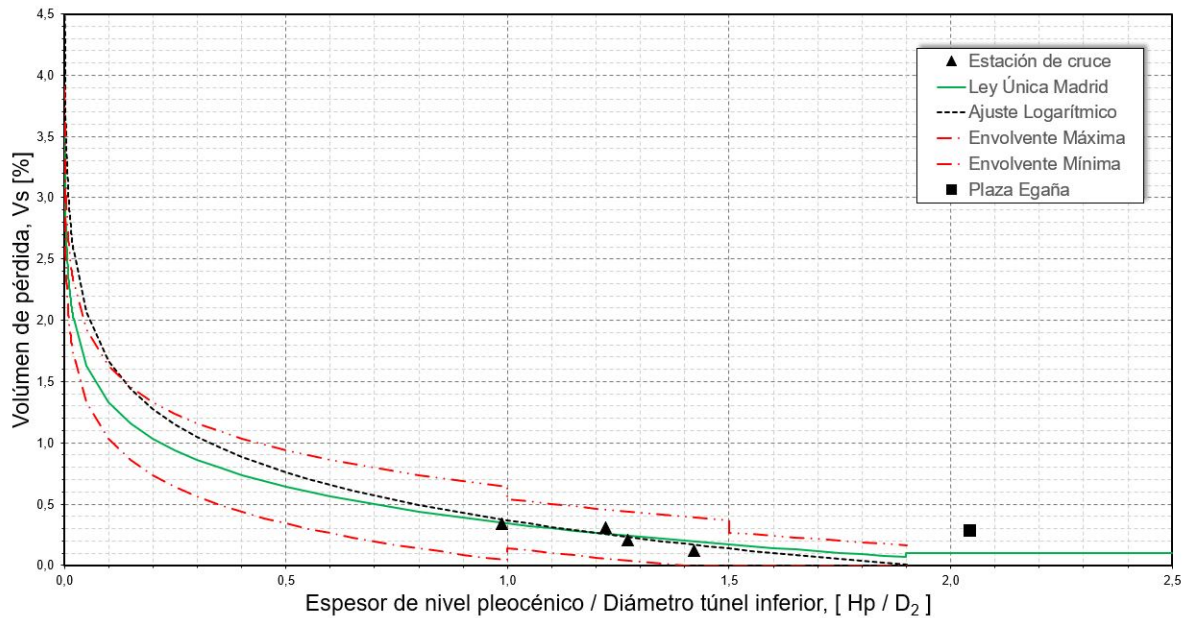


Figura 6.9: Ley de asientos (en profundidad) y envolventes propuestas por Díez (2010)

Si bien la correlación de la curva de la figura 6.6 es relativamente baja, es mucho mayor a la obtenida por Díez (2010) para todos los criterios que evaluó. Sin embargo, es necesario indicar que los tamaños muestrales de ese trabajo son inmensamente mayores a los utilizados en éste, debido a que se trabaja solo con registros de los puntos de estaciones de combinación.

### 6.2.2. Relación asentamientos en profundidad y superficie

La información disponible sobre asentamientos en superficie y en profundidad permite verificar si la deducción de uno en función de otro (Oteo, 2003) es correcta. Para ello se cuenta con los volúmenes de asentamientos calculados para ambos casos, con lo cual se puede verificar si la hipótesis inicial (figura 2.11) es correcta.

La tabla 6.4 muestra el coeficiente corrector calculado para los 5 casos de estudio.

Tabla 6.4: Volumen de asentamientos reales y obtenidos mediante ajustes

Estación de cruce	$V_l$ [%] (profundidad)	$V_l$ [%] (superficie)	Coef. Corrector
Cal y Canto	0,12	0,12	0,99
Plaza de Armas	0,31	0,21	1,47
Universidad de Chile	0,34	0,31	1,07
Irarrázaval	0,21	0,20	1,04
Plaza Egaña	0,28	0,32	0,88

La información de la tabla anterior muestra que solo en 2 de los 5 casos se cumpliría la deducción de Oteo (2003) sobre asentamientos en profundidad respecto a los superficiales, ya que no se cumple la hipótesis de similitud de volúmenes de asentamientos (figura 2.11) bajo coeficiente corrector

entre 0,8 y 1,0. Lo anterior se puede notar al observar que los asentamientos en superficie son mayores que los en superficie en la mayoría de los casos estudiados, en contraposición a lo que dice la teoría.

### 6.3. Análisis de registros en superficie

#### 6.3.1. Volúmenes de asientos

Graficando el recubrimiento relativo superior versus el volumen de asientos porcentual para los registros en superficie se obtiene lo siguiente:

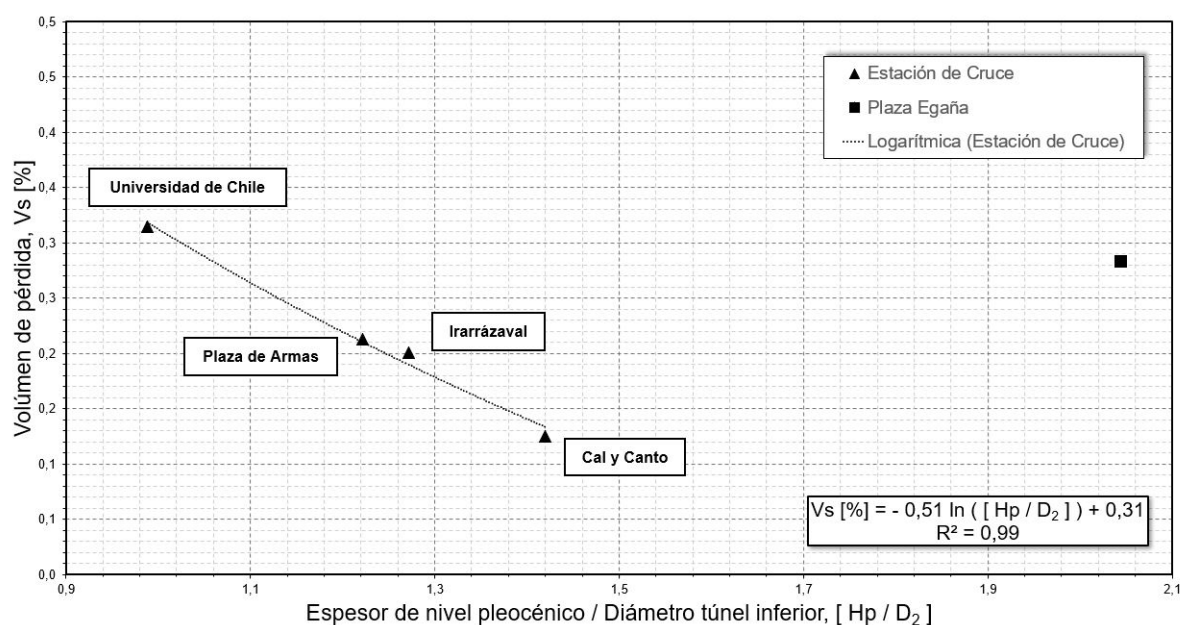


Figura 6.10: Variación de volumen de asientos (en superficie) en función de  $H_p/D_2$

Posteriormente, se realiza un ajuste logarítmico de los casos de estudio sin considerar el cruce de estación Plaza Egaña debido a su notorio comportamiento diferente. Así, se grafica el ajuste obtenido en comparación con la ley propuesta por Díez (2010).

Comparando el ajuste con el criterio de recubrimiento total  $H_t < 2$  (figura 2.1) se obtiene el gráfico de la figura 6.12.



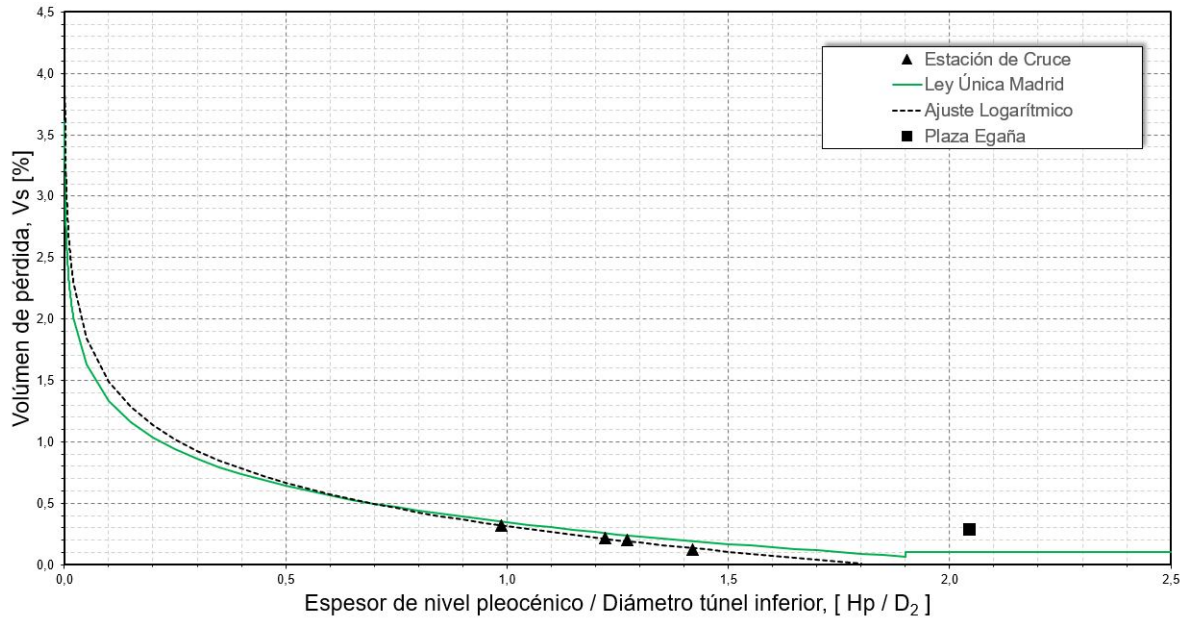


Figura 6.11: Ley de asientos obtenida (en superficie) en función de  $H_p/D_2$ , contrastada con ley propuesta por Díez (2010)

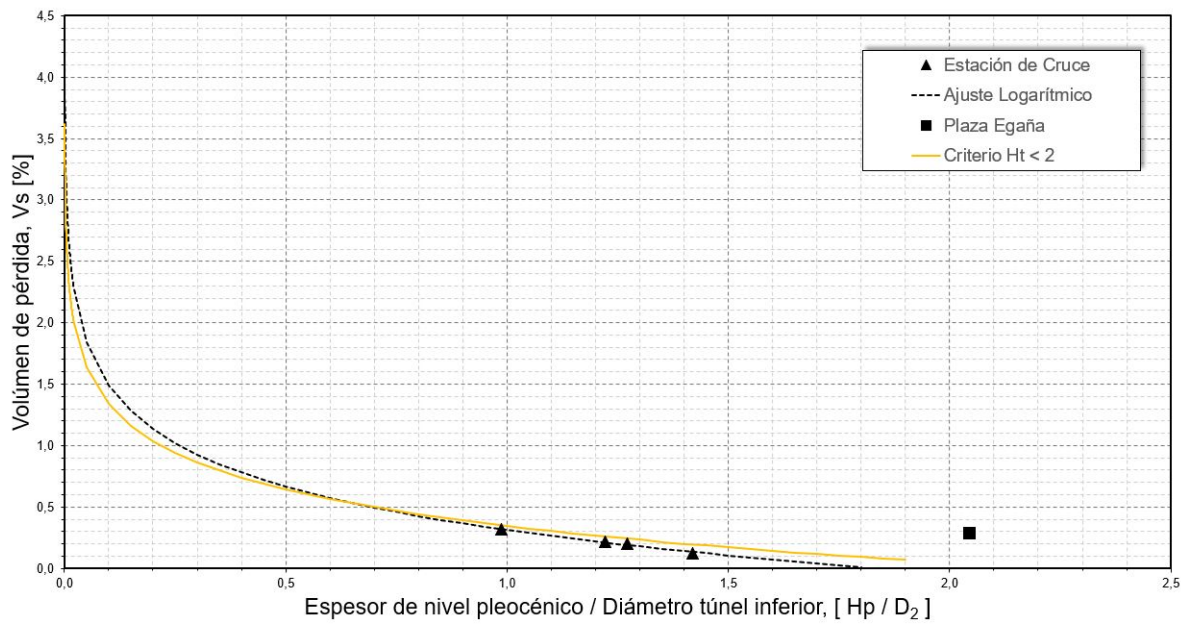


Figura 6.12: Ley de asientos obtenida (en superficie) en función de  $H_p/D_2$ , contrastada con criterio de recubrimiento total, Díez (2010)

A modo de evaluar cuál de los dos criterios se asemeja más al ajuste logarítmico realizado con los volúmenes calculados, se calcula el *ECM*, el cual se muestra en la tabla 6.5.

Al gráfico de la figura 6.11 se aplican las envolventes máximas y mínimas propuestas por Díez (2010) para evaluar su aplicación a los casos de estudio figura 6.10.

Tabla 6.5: Cálculo de ECM entre la curva de ajuste (caso en profundidad) y las leyes de asiento propuestas por Díez (2010)

	<b>Ley Única</b>	<b>Criterio Ht &lt;2</b>
<b>ECM</b>	0,071	0,068

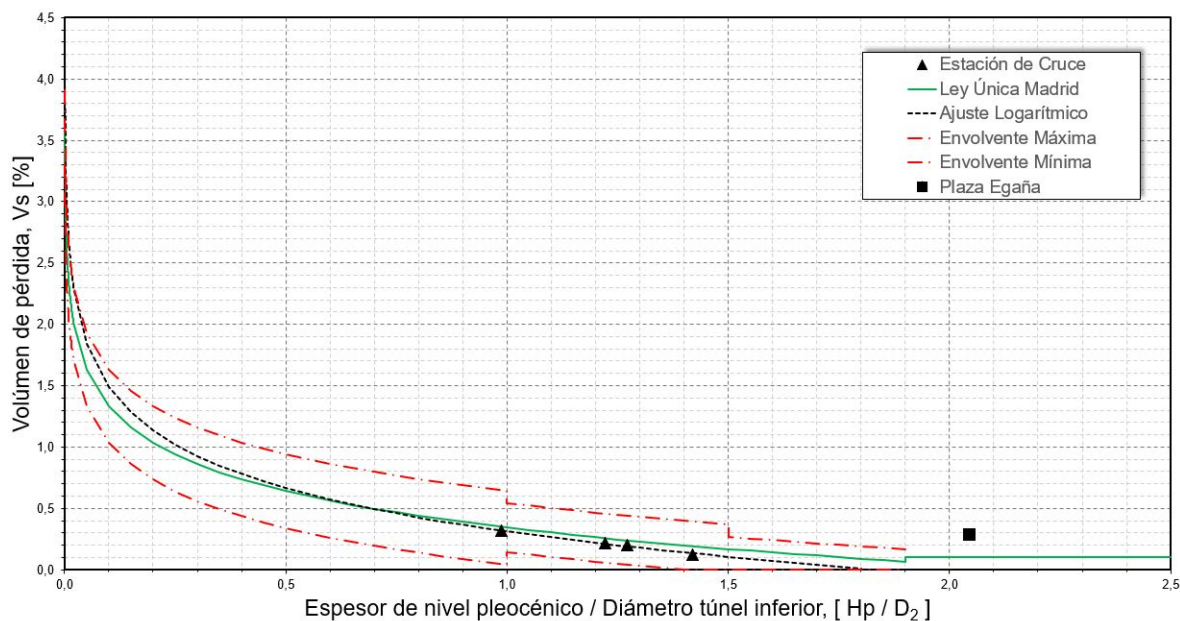


Figura 6.13: Ley de asientos (en superficie) y envolventes propuestas por Díez (2010)

La tabla 6.6 muestra los valores de volumen de asientos reales y obtenidos mediante ajustes y leyes del Nuevo Modelo de Madrid.

Tabla 6.6: Volumen de asientos (en superficie) reales y obtenidos mediante ajustes

Estación de cruce	Vs [%]			
	Real	Ajuste	Muestra Ht <2	Ley única
Cal y Canto	0,125	0,133	0,194	0,193
Plaza de Armas	0,213	0,210	0,259	0,257
Universidad de Chile	0,315	0,319	0,350	0,348
Irarrázaval	0,200	0,190	0,242	0,240
Plaza Egaña	0,323	-0,053	0,037	0,036

La curva del gráfico de la figura 6.10 muestra una correlación de casi 1, lo cual nos dice que los volúmenes de asientos calculados mediante los asentamientos en superficie se rigen bajo la misma ley de asientos, la cual probablemente sea igual para todo el Tramo C (Anexo B) de la línea 3.

# Capítulo 7

## Comentarios y Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo de investigación desarrollado, considerando los diversos aspectos analizados.

Primeramente, se comentan los resultados obtenidos de los perfiles de asentamiento y la aplicación de la teoría de Peck (1969), junto con el análisis de las estimaciones de asentamiento entregadas por el consorcio AWPA.

Posteriormente, se analiza la dependencia de los asentamientos frente a cambios en las dimensiones de los túneles y sus profundidades. Para esto se estudian los gráficos obtenidos en el capítulo 5.

Luego, se analiza la aplicabilidad del Nuevo Modelo de Madrid (2010) sobre los suelos de Santiago y los métodos constructivos utilizados mediante la obtención de resultados del capítulo 6.

Finalmente, se presentan recomendaciones y limitaciones para futuras líneas de investigación.

## 7.1. Comentarios y Conclusiones

### 7.1.1. Perfiles de asentamiento

La construcción de los perfiles de asentamiento se llevó a cabo bajo la teoría de Peck (1969) con la distribución de campana de Gauss invertida, debido a que ha tenido los mejores resultados al representar de buena manera los perfiles transversales utilizando mediciones en superficie (Maras-Dragocevic, 2012). Esta técnica ha sido aceptada ampliamente como un buen método empírico.

Graficando los registros de asentamiento tomados en superficie y en profundidad mediante los métodos indicados en el Capítulo 3, se pudo verificar que el perfil de asentamientos efectivamente se aproxima de buena manera mediante el método de Peck (1969). De acuerdo a esto, se puede concluir que los asentamientos medidos en terreno forman una cubeta de Atterwell que se representa transversal y longitudinalmente mediante perfiles de asentamiento con forma de campana de Gauss invertida, la cual queda bien representada mediante la relación de Peck (1969).

Por otro lado, queda demostrado que la obtención del parámetro  $i$  mediante la minimización del *ECM* funciona de buena manera para la curva de la ecuación 2.1, ya que con esto se establece una curva lo más cercana posible a los puntos medidos en terreno. Lo anterior sugiere que la obtención del parámetro  $i$  mediante el método de minimización del *ECM* es eficiente debido a la simplicidad de su aplicación.

Las precisiones de las estimaciones de los asentamientos máximos entregadas por el Consorcio AWWPA fueron conservadoras debido a la incertidumbre de los comportamientos de los suelos y materiales de construcción. Así, los valores de asentamiento medido fueron siempre menores a los estimados (nunca alcanzando los umbrales de alarma) y los rangos funcionaron de buena manera, aunque estos en algunos casos son grandes. Lo anterior se puede deber a que los límites superiores fueron obtenidos mediante métodos de pérdida de volumen (Dr. Sauer and Partners, 2012), para los cuales se utilizaron valores de volumen de asientos esperados elevados, probablemente por la poca experiencia en el trabajo con gravas de Santiago y la poca información disponible en este ámbito. Esto se suma a las razones discutidas en el Capítulo 4: Incertidumbre de los parámetros del suelo, métodos constructivos y materiales.

### 7.1.2. Influencia de las dimensiones

En general, es común trabajar con diámetros equivalentes en vez de áreas transversales de los túneles. Lo anterior se hace para evitar las complicaciones que implicaría el trabajar con la forma real del túnel y sus cambios de sección a lo largo de la línea de Metro, por lo que se simplifica esta condición al idealizar el túnel como una circunferencia. Sin embargo, en el gráfico de la figura 5.19 se trabaja con los anchos reales de los túneles, los cuales son mayores de mayor magnitud con respecto a los diámetros equivalentes. Esto se justifica por la presunción de que el ancho del túnel debería ser directamente influyente sobre la generación de mayores o menores anchos de asentamiento, lo cual se ve reflejado en la baja correlación que se obtiene al graficar los mismos parámetros, pero cambiando ancho de túnel por diámetro equivalente (figura 5.20)



En el gráfico de la figura 5.19 se incluyen los cinco cruces en estudio, sin discriminar el suelo en el que fueron excavados. Esto se hizo debido a que se busca una ley para representar los asentamientos de toda la línea, y que además pueda ser ajustada a futuro en la construcción de futuras líneas de Metro. Así, la curva obtenida muestra una muy buena correlación de los datos, lo que indica que se encontró una forma de relacionar todos los parámetros sin depender directamente del tipo de suelo.

Por otro lado, el gráfico de la figura 5.18 muestra la dependencia del parámetro  $i$  con la profundidad. Como se dijo anteriormente, Peck (1969) y otros autores obtuvieron relaciones entre las profundidades de los túneles y los parámetros  $i$  para diferentes tipos de suelo. Así, se obtuvo una relación para las gravas de Santiago. En conclusión, utilizando esta gráfica se pueden predecir los anchos de asentamiento que se producirán al excavar un túnel bajo otro existente, aunque es importante mencionar que esta curva debe ajustarse con mayor cantidad de datos.

Es importante recalcar que todas estas curvas son obtenidas con un tamaño muestral pequeño, por lo tanto, es importante alimentar y calibrar estos resultados con información de las futuras líneas de Metro.

### **7.1.3. Verificación del Nuevo Modelo de Madrid**

En el capítulo 6 se trabajó en pos de verificar la aplicabilidad del Nuevo Modelo de Madrid (Díez, 2010) bajo las condiciones del escenario de Metro de Santiago: Construcción con Nuevo Método Austriaco y gravas de Santiago.

Los gráficos de las figuras 6.7 y 6.11 muestran un buen comportamiento de los datos en comparación con la ley única propuesta por Díez (2010), considerando que los cuatro casos de grava de Santiago caen en el tramo central del gráfico, es decir, con recubrimiento terciario relativo entre 1 y 1,5 (figura 2.13). En conclusión, se podría adoptar la ley única de Díez (2010) en las gravas de Santiago, lo cual puede llevar a estimaciones rápidas de asentamiento por volumen de asientos al obtener un parámetro  $i$  con el método descrito en la subsección anterior.

En los gráficos de las figuras 6.6 a la 6.13 no se consideró el caso de Plaza Egaña por quedar fuera de cualquier ley y envolvente. Esto ocurre en el estudio de Díez (2010) en un 35 % de los casos estudiados, donde un 4 % quedó por sobre la envolvente máxima y un 31 % bajo la mínima. Por lo tanto, la ley única se comporta de manera similar para los suelos de Santiago, donde se tuvo un 20 % de casos fuera de la envolvente, a pesar de que se cuenta con mucha menos cantidad de información. Así, se confirma que la ley de Díez (2010) es aplicable sobre los suelos de Santiago.

El gráfico de la figura 6.10 muestra una correlación particularmente buena en comparación con la figura 6.6. Esto se puede deber a que las mediciones en superficie miden el asentamiento real del suelo sobre la clave del túnel superior, mientras que las mediciones en profundidad se llevaron a cabo dentro del túnel, sobre la losa. Así, estas últimas mediciones registran el asentamiento del túnel, el cual no necesariamente será el mismo del suelo. En conclusión, se confirma que la rigidez del túnel provoca que éste no se deforme solidariamente con el suelo, por lo que para obtener datos reales del asentamiento del suelo en profundidad se deben generar otro tipo de inspecciones,

las cuales no son consideradas en este tipo de proyectos debido a el costo económico que conllevan.

Analizando la deducción de asentamientos en profundidad en función de los superficiales generada por Oteo (2003), se puede observar que la hipótesis no se cumple para los casos estudiados (tabla 6.4). Además, en la tabla 4.9 se puede notar que en todos los casos (salvo Plaza de Armas) los asentamientos en superficie son mayores (o iguales) a los en profundidad, contrario a lo que dice la hipótesis. Lo anterior confirma el hecho de que los asentamientos medidos dentro del túnel no son necesariamente iguales a los del suelo. Sumado a esto, ITA (2006) menciona que, en general, para los casos en que  $H/D < 2,5$  (como los 5 casos que se estudian) los asentamientos en superficie son similares a los en profundidad, lo cual se cumple para 4 de los 5 cruces.

Por otro lado, los gráficos de las figuras 6.9 y 6.13 muestran que los volúmenes de asientos caen dentro de la envolvente con holgura, por lo que se está en condiciones de bajar nuevamente el valor de ella de  $\pm 20$  a  $\pm 10$  (figura 7.1).

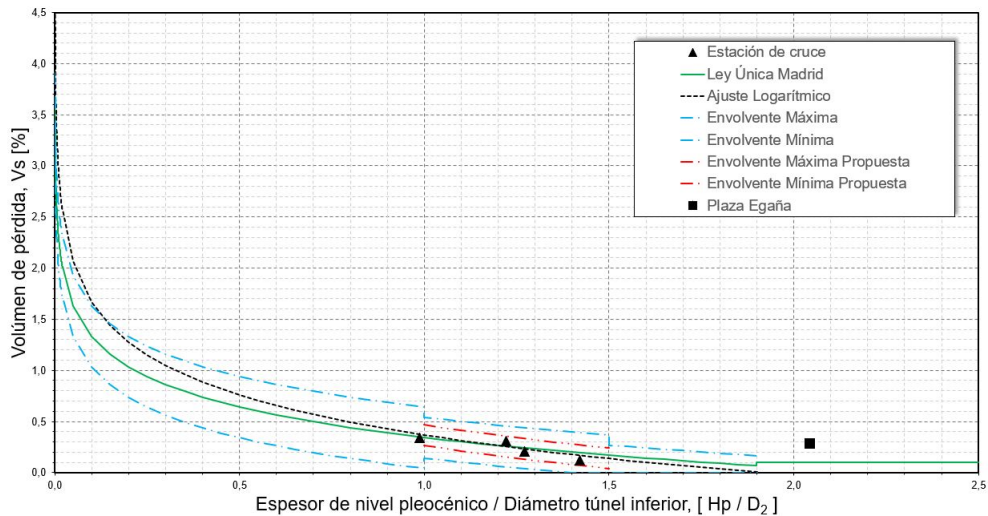


Figura 7.1: Propuesta de disminución de envolvente máxima y mínima en el tramo central

Esta disminución de la envolvente puede ser útil a la hora de definir rangos de estimación de asentamientos de manera sencilla, lo cual es muy útil como primer input en la fase de prediseño de un túnel de Metro.

## 7.2. Recomendaciones para futuras líneas investigativas

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones, indicaciones y limitaciones para futuras líneas de investigación en base al presente trabajo:

- Primeramente, sería interesante aplicar el modelo en las futuras y más próximas líneas de Metro a diseñar para estimar asentamientos máximos en puntos de cruce de líneas. De esta forma, se pueden contrastar los resultados obtenidos con las estimaciones convencionales y evaluar la concordancia entre ellos. Finalmente, se puede llevar a cabo el mismo ejercicio de evaluar los asentamientos reales de los túneles, para con ello obtener una curva que estime el ancho de asentamiento para suelos finos y de transición de Santiago y calibrar la curva para gravas de Santiago.
- Si el modelo resulta tener resultados con cierta precisión sobre las nuevas líneas, será necesario calibrar herramientas como los gráficos para estimación de parámetro  $i$  (figura 5.18) y el volumen de asientos (figuras 6.6 y 6.10), ya que la información con la que se cuenta actualmente es mínima.
- Alimentar el gráfico de la figura 5.19 con nuevos registros de asentamientos es importante para verificar la validez de este resultado, ya que contar con ese gráfico sería una herramienta poderosa para la estimación rápida de asentamiento de líneas existentes por su posible aplicación sobre cualquier suelo.

- Se debe verificar si la disminución de la envolvente mostrada en el gráfico de la figura 7.1 se comporta bien bajo nuevos registros de volumen de asientos. Además, sería útil realizar el mismo ejercicio sobre los otros tramos del gráfico.
- El trabajo realizado se trató siempre para casos de combinación de dos líneas de Metro (construcción de un túnel bajo otro existente). Sin embargo, sería útil evaluar la aplicación de los resultados obtenidos para casos de combinación de 3 líneas (construcción de túnel bajo dos túneles existentes), lo cual ya se espera que ocurra en las próximas líneas a construir.

# Bibliografía

- BUREAU (2014). Análisis de Confiabilidad de la Excavación del Túnel de la Estación Universidad de Chile en Línea 3 del Metro de Santiago. Emitido por Consorcio Arcadis - Sener - Ara.
- De la Fuente, P. y Oteo, C. (1996). *Theoretical research on the subsidence originated by underground in urban areas.*
- Díez, F. Oteo, C. (2014). Nuevo Modelo Madrid para la Estimación de Asientos Producidos en Túneles Ejecutados con Tuneladoras EPB de Gran Diámetro. *Revista de Obras Públicas*, 3557:55 – 68.
- Díez, F. (2010). Nuevo modelo Madrid para la estimación de asientos producidos en túneles con tuneladoras epb de gran tamaño, Tesis de Doctoral, Universidad Politécnica De Madrid.
- Dr. Sauer and Partners Corporation (2012). Metro de Santiago Línea 3, Settlement and Recommendations Report. Emitido por Consorcio Arcadis - Sener - Ara.
- International Tunnelling and Underground Space Association (2007). Settlements induced by tunneling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22:119 – 149.
- Maras-Dragojevic, S. (2012). Analysis of Ground Settlement Caused by Tunnel Construction. *Gradevinar*, 64:573 – 581.
- Metro (2013). A. Deformación de Líneas Existentes Producto de la Excavación de Línea 3. Emitido por Consorcio AWWA.
- Metro (2014). B. Informe Revisión Antecedentes y Validación Mecánica de Suelos Línea 3 Metro de Santiago. Emitido por Consorcio AWWA.
- Montes, C. Pozo, J. (2015). *Metro de Santiago Línea 3, Monitoreo Geotécnico [Diapositivas].*
- Mora, M. (2000). Modelación de la unidad geotécnica gravas de santiago para túneles de metropolitano usando flac3d, memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Oteo, C. (2001). *Trabajo de Investigación: Prevención de daños inducidos por la excavación de túneles en estructuras próximas.*
- Oteo, C., Arnaiz, M., Trabada, J., and Mellis, M. (1999). *The Madrid Model: a semiempirical*

*method for subsidence estimating.* World Tunnell Congres, Oslo.

Oteo, C., Rodríguez Ortiz, J., and Mendaña, F. (2003). Sobre los sistemas de construcción y parámetros geotécnicos de diseño en la ampliación del Metro de Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 3429.

Peck, R. B. (1969). *Deep Excavation and Tunneling.* Proceedings of the 7th International Conference on Soil - ICSMFE, Mexico.

Rodríguez Ortiz, J., Oteo, C., and Mellis, M. (2001). *Estrategia geotécnica aplicada a la ampliación del Metro de Madrid 1995-1999.* Libro homenaje al Profesor Jiménez Salas.

Sagaseta, C. (1987). Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*, 37.

Sagaseta, C., Moya, J., and Oteo, C. (1981). *Estimation of ground subsidence over urban tunnels.* Proceeding 2<sup>nd</sup> Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff.

Sagaseta, C. y Oteo, C. (1974). *Influencia de la Plastificación del Terreno Alrededor de un Túnel en los Asientos Superficiales.* 1<sup>er</sup> Simposio Nacional de Túneles, Madrid.

Torres, R. (2014). *Electroniveles - Instrumentos de Medición de Desplazamientos Túnel de Línea 1 [Diapositivas].*

# **Capítulo 8**

## **Anexos**

### **8.1. Anexo A: Perfiles Estratigráficos**











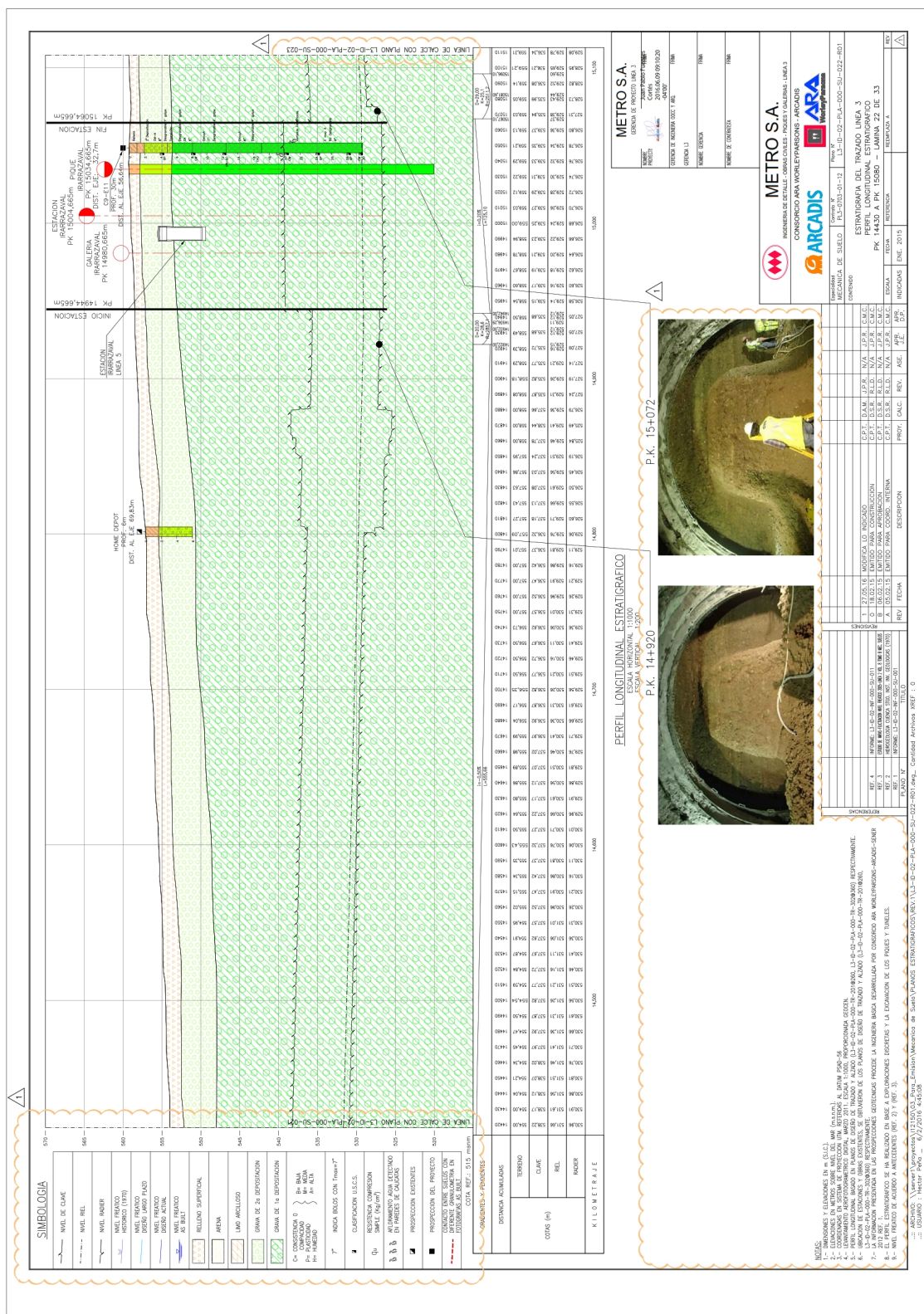


Figura 8.4: Estratigrafía Estación Irarrázaval





## 8.2. Anexo B: Informe de Mecánica de Suelos

El estudio de mecánica de suelos fue realizado por la empresa PETRUS, basado en exploraciones con calicatas, ensayos en terreno y laboratorio y la experiencia de proyectos similares anteriores. Con este informe y con la revisión de antecedentes geotécnicos disponibles para ese entonces, el consorcio AWPA genera la validación y entrega las recomendaciones para el diseño de la línea 3.

### 8.2.1. Sectorización del trazado

Para empezar, se genera una sectorización que divide el trazado de la línea 3 en los siguientes tramos:

- **Tramo 1:** Desde intersección de avenidas Vicente Pérez Rosales y Larraín (Comuna de La Reina), hasta el cruce de avenidas San Diego y Santa Isabel (Comuna de Santiago).
- **Tramo 2:** Desde el cruce de avenidas San Diego y Santa Isabel (Comuna de Santiago), hasta el cruce de avenidas Independencia y Dorsal (Comuna de Conchalí).
- **Tramo 3:** Desde el cruce de avenidas Independencia y Dorsal (Comuna de Conchalí), hasta el cruce de avenidas Américo Vespucio con Independencia (Comuna de Huechuraba).

Posteriormente, el consorcio propone una zonificación del trazado, definiendo tramos según la estratigrafía característica presente en cada uno de ellos:

- **Tramo A, Finos del Noroeste:** Desde Cola de Maniobras hasta estación Cardenal Caro.
- **Tramo B, Transición Finos del Noroeste a Gravas del Río Mapocho:** Desde estación Cardenal Caro a estación Plaza Chacabuco.
- **Tramo C, Gravas del Río Mapocho:** Desde estación Plaza Chacabuco a estación Diagonal Oriente.
- **Tramo D, Gravas del Río Mapocho y Finos de Cono de Deyección:** Desde estación Diagonal Oriente hasta Cola de Maniobras de estación Larraín.

### 8.2.2. Parámetros Geotécnicos

Se proponen los siguientes parámetros geotécnicos para los tipos de suelo expuestos anteriormente.

Tabla 8.1: Propiedades Geotécnicas Gravas de Santiago

Parámetro	Simbología	Unidades	Profundidad [m]	Valor
Peso Unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>		18,5
Módulo de Deformación	$E$	kPa	todo Z	20.000 + 2.750 Z z en metros
Módulo de Deformación en Descarga y Recarga	$E_D$	kPa	todo Z	2E
Módulo de Poisson	$\nu$	[-]	todo Z	0,30
Coeficiente de Empuje en Reposo	$K_0$	[-]	Z ≤ 12	0,65
			Z < 12	0,45
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	todo Z	31
Cohesión	$c$	kPa	Z ≤ 10	30
			Z > 10	55
Ángulo de Dilatancia	$\psi$	$\gamma$	todo Z	0

Tabla 8.2: Propiedades Geotécnicas Finos del Norte y Cono de Deyección

Parámetro	Simbología	Unidades	Profundidad [m]	Valor
Peso Unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>		22,5
Módulo de Deformación	$E$	kPa	Z ≤ 6,5	46.000 + Z <sup>0,55</sup> z en metros
			Z > 6,5	66.000 + Z <sup>0,55</sup> z en metros
Módulo de Deformación en Descarga y Recarga	$E_D$	kPa	todo Z	2E
Módulo de Poisson	$\nu$	[-]	todo Z	0,25
Coeficiente de Empuje en Reposo	$K_0$	[-]	6 < Z ≤ 24	0,9 - 0,0356 (Z - 6) con Z en metros
			Z > 24	0,26
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	Z ≤ 6,5	53 - 45
			Z > 6,5	53 - 45
Cohesión	$c$	kPa	Z ≤ 6,5	12,5 - 20
			Z > 6,5	21,5 - 35
Ángulo de Dilatancia	$\psi$	$\gamma$	todo Z	12

### 8.2.3. Ubicación de Calicatas

Tabla 8.3: Ubicación de Calicatas

Calicata	Coordenada Este	Coordenada Norte	Profundidad [m]	Profundidad Nivel Freático [m]
C1	356,665	6.297.652	20,0	19,8
C2.1	356,011	6.298.010	20,0 (6,60)1	-
C3	355,797	6.297.932	20,0	-
C4-E17	355,364	6.297.910	30,0	-
C5-E15	353,204	6.297.533	30,0 (18,35)	-
C6-E14	351,881	6.297.448	30,0	-
C7-E13	351,04	6.297.563	35,0 (18,0)	17,7
C8-E12	350,205	6.297.626	26,0 (23,0)	22,6
C9-E11	348,895	6.297.520	30,0	-
C10-E10	347,574	6.297.143	26,0	22,10
C11	346,754	6.297.800	26,0	-
C12-E9	346,717	6.298.429	30,0	28,9
C13-E7	346,518	6.299.932	30,0	-
C14	346,384	6.300.369	21,0	21,0
C15	346,28	6.300.838	22,0	-
C16-E6	346,15	6.301.539	22,0	-
C17	346,024	6.301.877	22,0	-
C18	345,918	6.302.243	22,0	-
C19-E5	345,736	6.302.775	24,52	- (+)
C20	345,538	6.303.040	20,0	-
C21	345,081	6.303.577	22,0	-
C22-E4	344,602	6.303.812	25,0	-
C23	344,55	6.304.133	20,0	-
C24	344,357	6.304.552	20,0	-
C25-E3	344,018	6.305.028	25,0	-
C26	343,772	6.305.390	20,0	-
C27	343,537	6.305.858	20,0	-
C28-E2	343,328	6.306.417	25,0	-
C29	343,113	6.306.667	20,0	-
C30	343,012	6.307.466	20,2	-
C31	343,261	6.307.529	20,0	-
C32	342,917	6.307.435	20,1	-

## 8.2.4. Descripción de las estratigrafías

### Tramo 1

#### Sector: Santa Rosa - Chile España

De acuerdo a las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C11 a C6-E14, se observan los siguientes horizontes estratigráficos:

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 0,6 m - 2,0 m:** Relleno compuesto por arcillas limosas agravas arcillosas, color marrón, humedad media, consistencia media en el caso de las arcillas y compacidad media en caso de gravas.
- **Horizonte H-2: de 0,6 m - 2,0 m a 4.1 m - 7.3 m:** Gravas arenosas (2da depositación), color gris a marrón, humedad baja a media, compacidad media a alta aumentado en profundidad. Las partículas de gravas de cantos presentan redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo entre 9” a 16”. Se observan estratificaciones aisladas de arcillas de espesor menor.
- **Horizonte H-3: de 4,1 m - 7,3 m a 26,0 m - 35,0 m:** Gravas arenosas arcillosas (1ra depositación) color gris a marrón, humedad media a alta, compacidad muy alta. Las partículas de gravas son de cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo sobre 15”. Se observan estratificaciones aisladas de arcillas de espesor menor.

#### Sector Chile España - Plaza Egaña

Las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C6 - E14 a C5 - E15, además de prospecciones previamente realizadas para otros proyectos de PETRUS, se observan los siguientes horizontes estratigráficos:

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 1,9 m - 3,1 m:** Relleno compuesto por limos arenosos y arcillas limosas, color marrón, humedad media, consistencia media a alta, los finos presentes son de plasticidad media a alta.
- **Horizonte H-2: de 1,9 m - 3,1 m a 5.8 m - 7.3 m:** Gravas arenosas (2da depositación), color gris a marrón, humedad media a baja, compacidad media a alta aumentado en profundidad. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo entre 7” a 9”.
- **Horizonte H-3: de 5.80 m - 7.30 m a 16,30 m - 17,90 m:** Gravas areno-arcillosas (1ra depositación) de color gris, humedad baja a media, compacidad alta. Las partículas de gravas presentan de cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo sobre 8”.
- **Horizonte H-4: de 16,3 m - 17,9 m a 21.4 m - 22,5 m (aprox.):** Arcillas limosas a limos arenosos, de color café a marrón, humedad media a alta, consistencia alta, los finos presentes poseen plasticidad baja a media. En la calicata C5 - E15 se tiene estratificación de gravas limosas de 0,5 m de espesor (aprox.) a los 19.0 m de profundidad.
- **Horizonte H-5: de 21.4 m - 22,5 m (aprox.) a 30.0 m:** Grava arenosa arcillosa (1ra depositación) de color marrón grisáceo, humedad media, compacidad muy alta. Las gravas presentes son de cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo sobre 16”. En calicata C6 - E14 se tiene una estratificación de grava arenosa similar a la 2da depositación de 1,20 m de



espesor a los 21,40 m de profundidad.

En la zona de la Plaza Egaña se cuenta con antecedentes de prospecciones anteriores consistentes en un sondaje de 30 m para la estación Plaza Egaña de Línea 4 y una calicata de 35 m de profundidad para el Mall Plaza Egaña. De estas prospecciones solo se cuenta con un perfil estratigráfico donde se señala la estratigrafía.

Con la información disponible, se tienen los siguientes horizontes estratigráficos para la Plaza Egaña.

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 6,0 m:** Limos arenosos, color marrón, humedad media, consistencia media a alta.
- **Horizonte H-2: de 6,0 m a 9,70 m - 11,0 m:** Gravas arenosas (2da depositación), color gris a marrón, humedad media a baja, compacidad alta. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo de 7”.
- **Horizonte H-3: de 9,70 m - 11,0 m a 22,0 m - 24,0 m:** Limos arenosos, color marrón, humedad media, consistencia alta. En el sondaje, se cuenta con ensayos SPT con valores de Índice de penetración de 25 y 50 golpes/pie. En la calicata se observan intercalaciones de gravas arenosas a los 14,5 m, 16,5 m y 19,5 m de espesor variable. También, existe la presencia de una estratificación de arenas limosas (Pumacita) de 0,5 m de espesor a los 19,0 m.
- **Horizonte H-4: de 22,0 m - 24,0 m a 30,0 m - 35,0 m:** Gravas areno - arcillosas (1ra depositación) de color marrón grisáceo, humedad media, compacidad muy alta. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo en torno a 12”.

### **Sector Plaza Egaña - Tobalaba**

De acuerdo a las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C4 - E17 a C1, además de prospecciones previamente realizadas por PETRUS para otras obras (Ref. 1), se observan los siguientes horizontes estratigráficos:

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 3,7 m - 6,3 m:** Limos arenosos de color café, humedad baja a media, consistencia media a alta, plasticidad baja a media. En calicata C3 se observa presencia de gravas aisladas de tamaño máximo hasta 2”.
- **Horizonte H-2: de 3,7 m - 6,3 m a 8,6 m - 10,4 m:** Gravas arenosas con bolsones arenolimosos, color gris café, humedad baja a media, compacidad alta a muy alta. Las partículas de gravas presentan cantos sub-redondeados a sub-angulares de tamaño máximo de 4”.
- **Horizonte H-3: de 8,6 m - 10,4 m a 14,3 m - 17,3 m:** Limos arenosos de color café claro a oscuro, humedad media a alta, consistencia muy alta, plasticidad baja a media. Se observa la presencia estratificaciones de gravas de cantos subredondeados a sub-angulares de tamaño máximo 2”.
- **Horizonte H-4: de 14,3 m - 17,3 m a 20,0 m - 23,3 m:** Gravas arenosas con presencia de bolones aislados, color gris a gris café, humedad media, compacidad muy alta. Las partículas de gravas presentan cantos subredondeados a sub- angulares de hasta 6”. Se observan algunas

intercalaciones de limo arenoso de color café, humedad media, plasticidad baja a media, consistencia muy alta.

- **Horizonte H-5: de 20,0 m - 23,3 m a 30,0 m:** Limos arenosos con intercalaciones de gravillas, color café, humedad media a lata, consistencia muy alta. Las partículas de gravas presentan son de cantos sub-redondeados a sub-angulares de hasta 1/4". Se debe destacar que en esta zona se tienen importantes incrementos de la pendiente natural del terreno, que incide en la irregularidad de las intercalaciones y endentados presentes en esta zona.

Se debe destacar que en esta zona se tienen importantes incrementos de la pendiente natural del terreno, que incide en la irregularidad de las intercalaciones y endentados presentes en esta zona.

## **Tramo 2**

### **Sector: Santa Isabel - Hipódromo Chile**

Las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C11 a C19 - E5, se observan los siguientes horizontes estratigráficos:

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 0,5 m - 5,0 m:** Rellenos heterogéneos compuesto por gravas arenosas a limos a limos arcillosos, con trozos de ladrillos y presencia de escombros, humedad y compacidad variable a lo largo del trazado.
- **Horizonte H-2: de 0,5 m - 5,0 m a 3,5 m - 7,0 m:** Gravas gruesa a fina arenosa (2da depositación) con presencia de bolones dispersos, color gris café a gris oscuro, humedad media a alta, compacidad muy alta. Los bolones presentan cantos redondeados a sub-redondeados de hasta 5".
- **Horizonte H-3: de 3,5 m - 7,0 m a 21,0 m a 30,0 m:** Gravas areno - arcillosas (Primera depositación) de color gris café, humedad media a alta, compacidad muy alta, con buena trabazón entre partículas. Las gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo de hasta 8".

### **Sector: Hipódromo Chile - Dorsal**

Este sector se caracteriza por el comienzo de la transición entre los suelos gravosos de las depositaciones del Mapocho (Primera y Segunda) y los finos del Noroeste de Santiago. Se observan entre estas depositaciones intercalaciones de limos a limos arenosos con gravas arenosas.

Las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C19 -E5 a C23, permiten distinguir los siguientes horizontes estratigráficos:

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 0,6 m - 2,9 m:** Relleno compuesto por limos arenosos con presencias de gravas dispersas, con trozos de ladrillos y escombros, color café a gris café, consistencia variable a lo largo del trazado.
- **Horizonte H-2: de 0,6 m - 2,9 m a 1,1 m - 4,0 m:** Limos arcillosos con baja presencia de arenas, color café, humedad media a alta, consistencia media a alta, plasticidad baja a media. Este horizonte se observa esporádicamente a lo largo del trazado.
- **Horizonte H-3: de 1,1 m - 4,0 m a 5.5 m - 19.2 m:** Gravas areno - limosas, de color gris a gris café, compacidad variable a lo largo del horizonte y el trazo siendo media a alta en

profundidad hacia la zona del Hipódromo Chile y baja media hacia Dorsal, trabazón variable de igual forma que la compacidad, humedad media a alta. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a subredondeados de tamaño máximo de hasta 8". Se aprecian intercalaciones de limos arenosos con presencia de arcillas de espesor variable entre 0,6 m a 3,7 m siendo significativo hacia el sector de Dorsal, color café, humedad alta, plasticidad media, consistencia alta a muy alta.

- **Horizonte H-4: de 5.5 m - 19.2 m a 25,0 m:** Gravas areno - arcillosas, color gris a gris café, compacidad media a alta, humedad media a alta, trabazón alta hacia el sector de Hipódromo Chile y baja hacia Dorsal. Gravas y bolones presentes de cantos redondeados a subredondeados de tamaño máximo de hasta 7". Hacia el sector de Hipódromo Chile las gravas se presentan más compactas con distribución similar a la 1ra depositación del Mapocho, en cambio hacia Dorsal, las gravas presentes son compacidad menor y similares características a la Segunda depositación.

### Tramo 3

Las prospecciones efectuadas en este sector, calicatas de C-23 a C-29, se observan los siguientes horizontes estratigráficos:

#### Sector: Teniente Bello - Supermercado Líder

En este sector continúa con la transición de los suelos gravosos de las depositaciones del Mapocho (Primera y Segunda) y los finos del Noroeste de Santiago. Se observan intercalaciones de gravas arenosas y arenas entre los limos arenosos dominantes. Estas intercalaciones tienen espesor variable, que va disminuyendo a medida que se acerca a Huechuraba.

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 0,4 m - 1,5 m:** Relleno compuesto por limos arcillosos, arenas y bolones aislados, con trozos de ladrillos y escombros, color café a gris, consistencia variable a lo largo del trazado.
- **Horizonte H-2: de 0,4 m - 1,5 m a 12,3 m - 15,0 m:** Intercalaciones heterogéneas de limos arenosos a limos arcillosos con gravas arenosas a arenas algo limosas, color gris a gris café, compacidad y consistencias altas, humedad media, los finos presentes muestran baja a media plasticidad. Los espesores de las intercalaciones varían de 0,6 m a 4,4 m. Las gravas presentes son de cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo hasta 3". La presencia de intercalaciones de gravas se encuentra localizada principalmente en hacia la zona de Dorsal, en cambio las arenas limosas se localizan hacia Huechuraba.
- **Horizonte H-3: de 12,3 m - 15,0 m a 25,0 m:** Intercalaciones de limos arenosos a limos arcillosos con gravas arenosas a arenas algo limosas, color gris a gris café, compacidades y consistencias muy altas, humedad media a alta, los finos presentes muestran plasticidad media a alta. Los espesores de las intercalaciones varían de 1,6 m a 3,6 m. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo hasta 3". La presencia de intercalaciones de gravas domina gran parte del trazado, disminuyendo su presencia hacia la zona de Huechuraba.

## **Sector: Supermercado Líder - Cola de Maniobras**

- **Horizonte H-1: de 0,0 m a 0,5 m - 1,4 m:** Relleno compuesto por limos y arenas, con trozos de ladrillos y escombros, color café a gris, consistencia alta. Se observa distribución variable a lo largo del trazado. Este relleno no se aprecia en la calicata C- 34.
- **Horizonte H-2: de 0,5 m - 1,4 m a 7,0 m - 12,05 m:** Limos arenosos a limos arcillosos, color café, humedad media, consistencia alta, plasticidad media a alta. El sector hacia Dorsal presenta mayor presencia de limos arenosos, en cambio limos arcillosos se presentan hacia Huechuraba. Se tiene presencia aislada de estratificaciones de arena media con escasa presencia de finos, color gris a gris café, humedad alta, compacidad alta, se aplanchona fácilmente. Estas estratificaciones se presentan con espesores de hasta 1,2 m.
- **Horizonte H-3: de 7,0 m - 12,05 m a 25,0 m:** Intercalaciones de limos arcillosos a limos arenosos con gravas arenosas y arenas medias con bajos porcentajes de finos, color café a gris café, compacidades y consistencias altas, humedad media a alta, los finos presentes muestran plasticidad media a alta. Los espesores de las intercalaciones alcanzan los 4,0 m. Las partículas de gravas presentan cantos redondeados a sub-redondeados de tamaño máximo hasta 3” con trabazón media a alta. En las arenas presentes son probables aplanchamientos.

### 8.3. Anexo C: Informe Deformaciones Estimadas

En este informe se entregan los resultados de las estimaciones de deformación de los túneles existentes a nivel de sello de fundación, producto de la excavación y construcción de la línea 3 en las futuras estaciones de combinación.

Para cada línea existente se entrega como base la estimación del máximo asentamiento vertical y la distribución de asentamientos verticales para la obtención de deflexiones. Estas estimaciones se entregan con rangos de variación producto de los diferentes estudios realizados por el consorcio y por empresas externas.

Las deformaciones se entregan de acuerdo a perfiles transversales de desplazamientos verticales a través de los cuales se obtienen desplazamientos máximos y distorsión angular máxima. La siguiente figura indica la forma en que la construcción del túnel influye sobre la superficie del suelo.

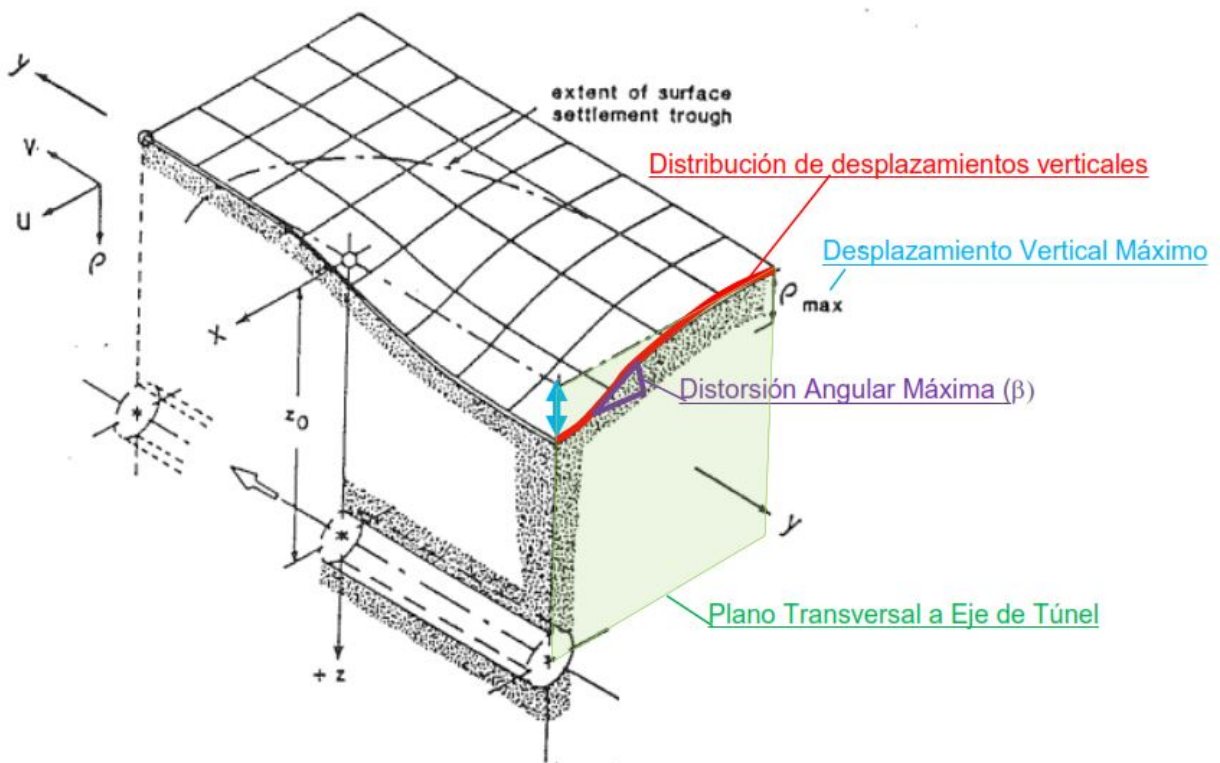


Figura 8.6: Efecto de Excavación de Túnel

#### Estimación Cal y Canto

A continuación, se muestran la vista en plana, corte transversal, distribución de asentamientos, asentamientos y distorsión angular máximos para el cruce de estación Cal y Canto.

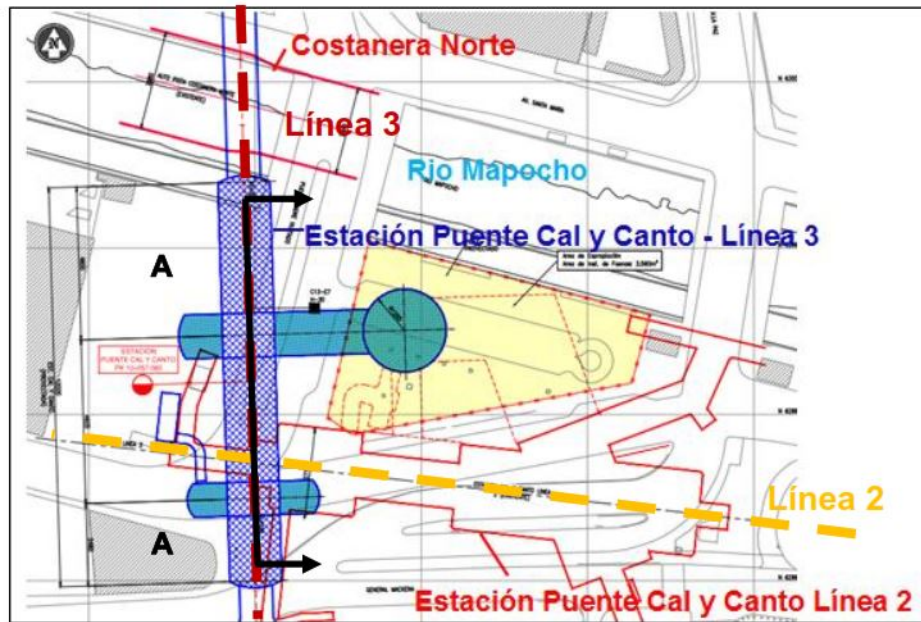


Figura 8.7: Vista en planta cruce estación Cal y Canto

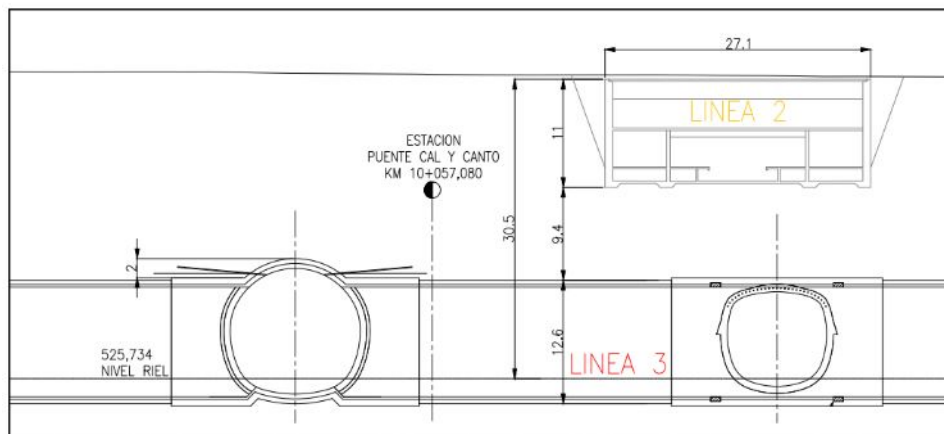


Figura 8.8: Corte transversal cruce Cal y Canto

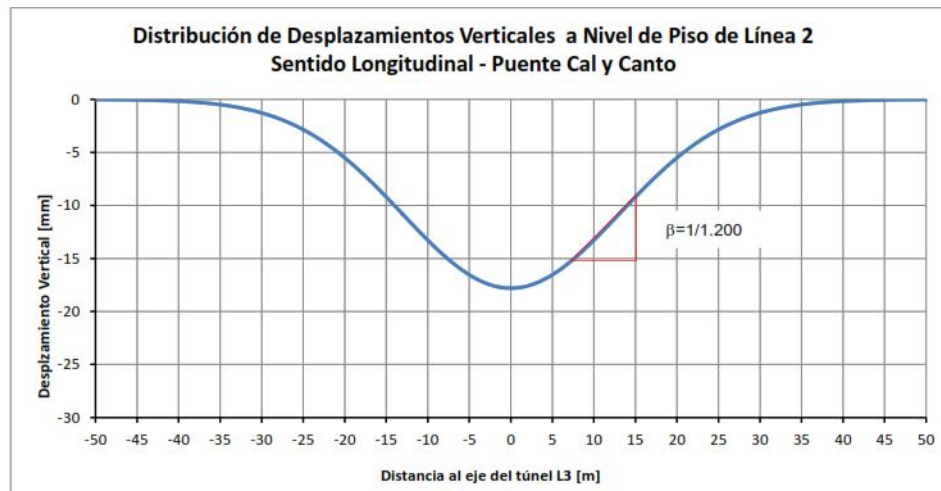


Figura 8.9: Distribución de asentamientos cruce Cal y Canto

Estimación de Asentamiento Máximo Esperado	Rango de Variación de Asentamiento Máximo
mm	mm
18	13 -23

Figura 8.10: Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Cal y Canto

## Estimación Plaza de Armas

A continuación, se muestran la vista en plana, corte transversal, distribución de asentamientos, asentamientos y distorsión angular máximos para el cruce de estación Plaza de Armas.

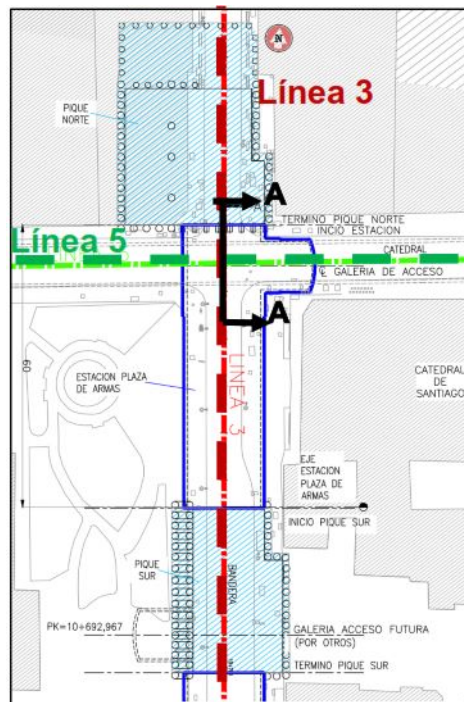


Figura 8.11: Vista en planta cruce estación Plaza de Armas

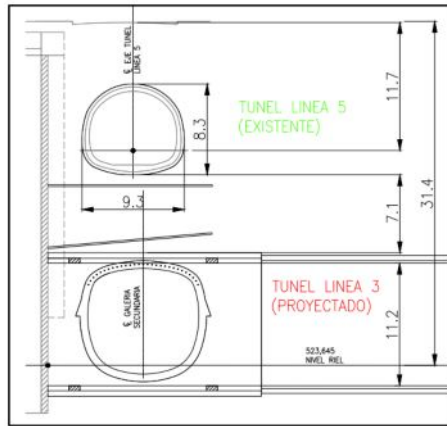


Figura 8.12: Corte transversal cruce Plaza de Armas

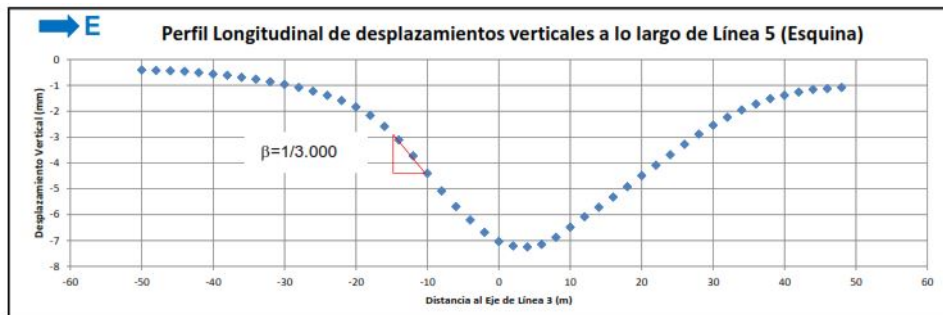


Figura 8.13: Distribución de asentamientos cruce Plaza de Armas

Estimación de Asentamiento Máximo Esperado	Rango de Variación Asentamiento Máximo	Rango de Distorsión Angular Máxima
mm	mm	
15	8 - 22	1/3.000-1/1.000

Figura 8.14: Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Plaza de Armas

## Estimación Universidad de Chile

A continuación, se muestran la vista en plana, corte transversal, distribución de asentamientos, asentamientos y distorsión angular máximos para el cruce de estación Universidad de Chile.



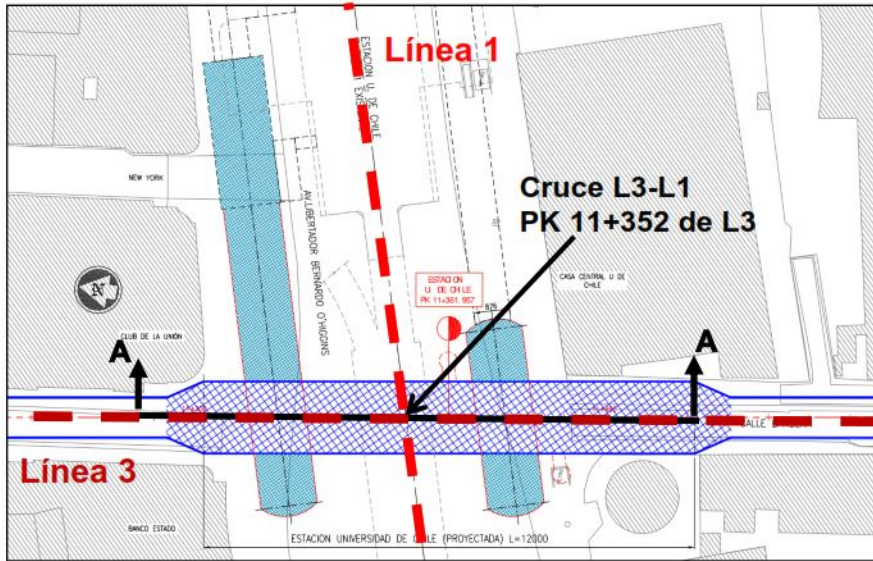


Figura 8.15: Vista en planta cruce estación Universidad de Chile

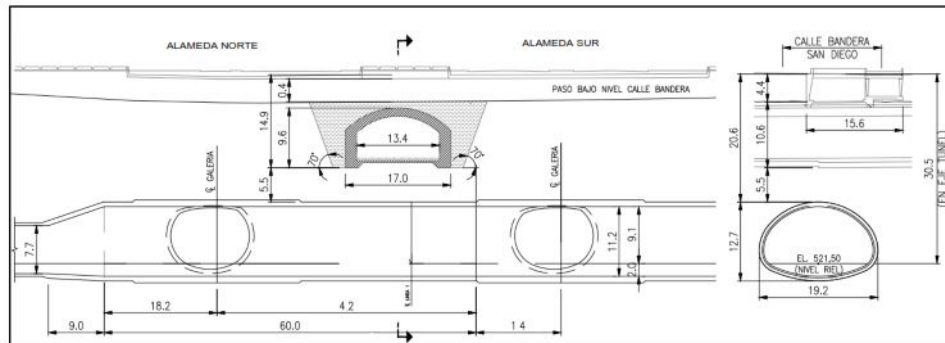


Figura 8.16: Corte transversal cruce Universidad de Chile

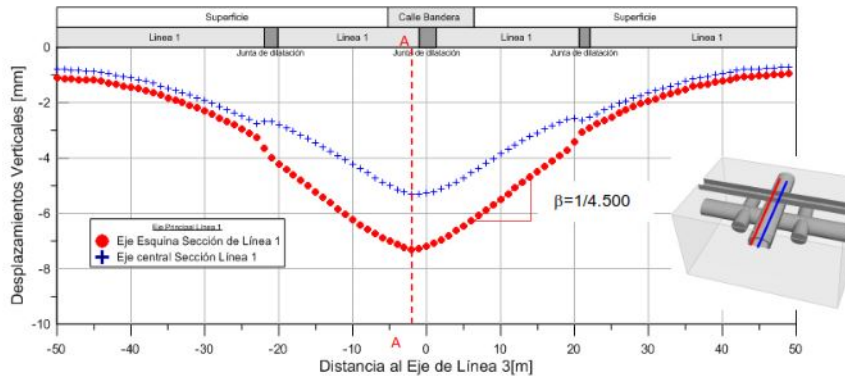


Figura 8.17: Distribución de asentamientos cruce Universidad de Chile

Estimación de Asentamiento Máximo Esperado	Rango de Variación Asentamiento Máximo	Rango de Distorsión Angular Máxima
mm	mm	
17	8 - 26	1/4.500-1/1.000

Figura 8.18: Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Universidad de Chile

## Estimación Irrarázaval

A continuación, se muestran la vista en plana, corte transversal, distribución de asentamientos, asentamientos y distorsión angular máximos para el cruce de estación Irrarázaval.

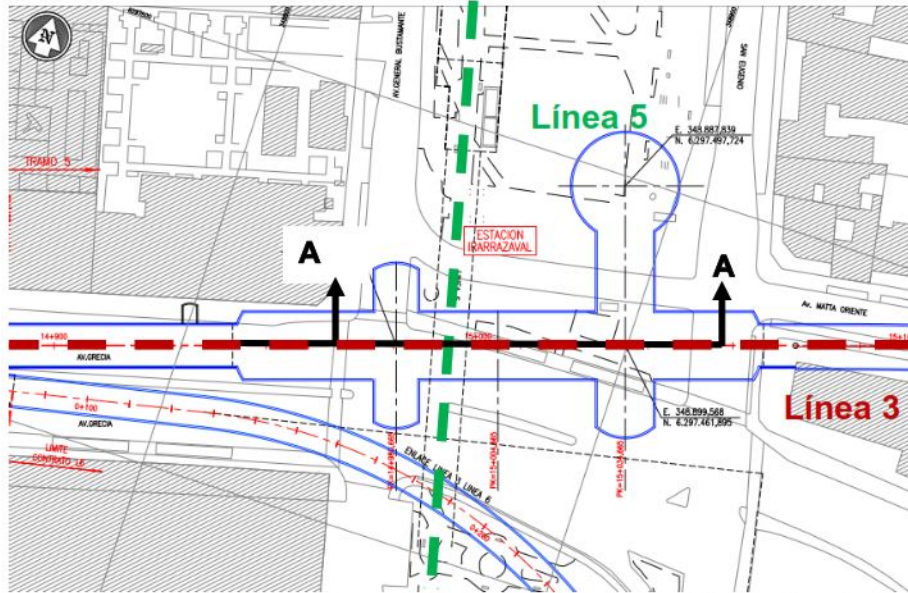


Figura 8.19: Vista en planta cruce estación Irarrázaval

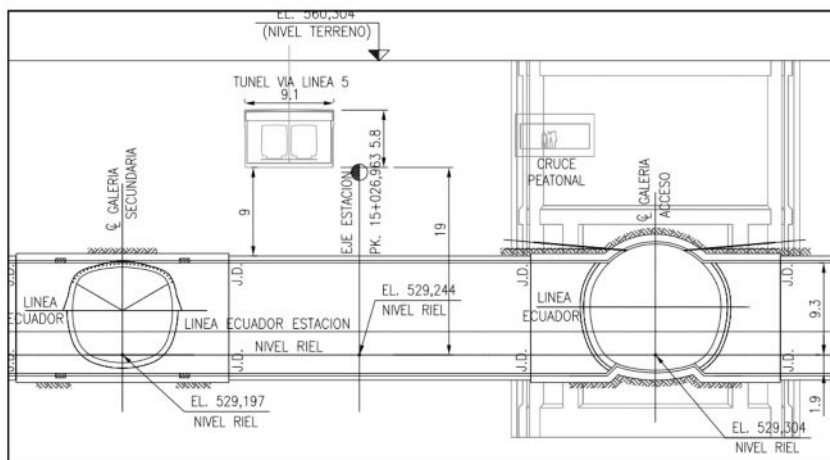


Figura 8.20: Corte transversal cruce Irarrázaval

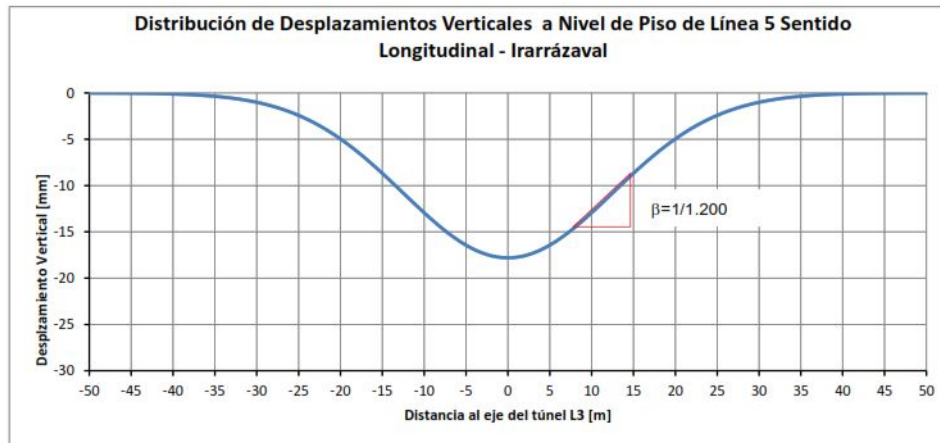


Figura 8.21: Distribución de asentamientos cruce Irrarázaval

Estimación de Asentamiento Máximo Esperado	Rango de Variación de Asentamiento Máximo
mm	mm
17	12 -22

Figura 8.22: Asentamiento esperado y rango de variación, cruce Irrarázaval

## Estimación Plaza Egaña

A continuación, se muestran la vista en plana, corte transversal, distribución de asentamientos, asentamientos y distorsión angular máximos para el cruce de estación Plaza Egaña.

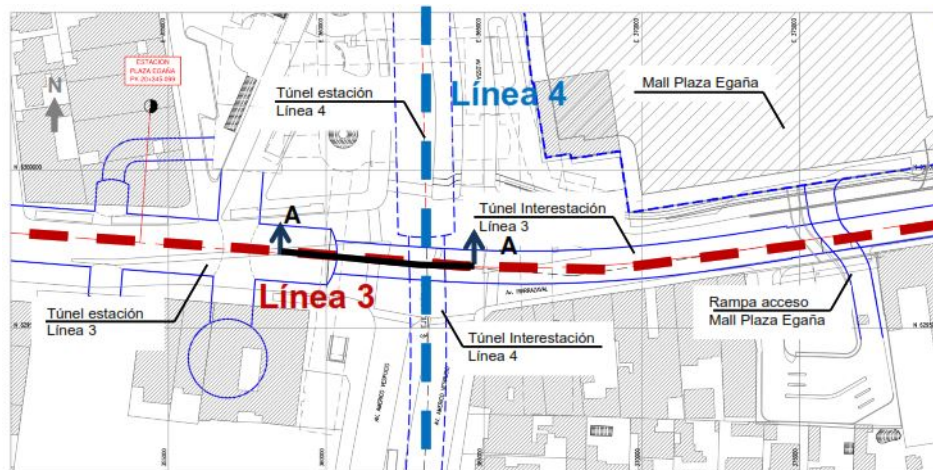


Figura 8.23: Vista en planta cruce estación Plaza Egaña

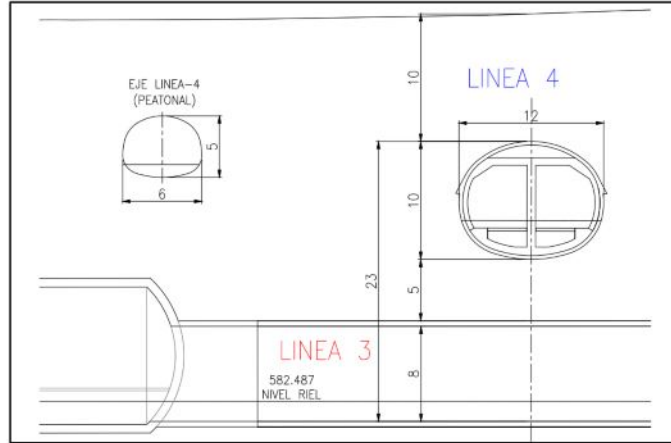


Figura 8.24: Corte transversal cruce Plaza Egaña

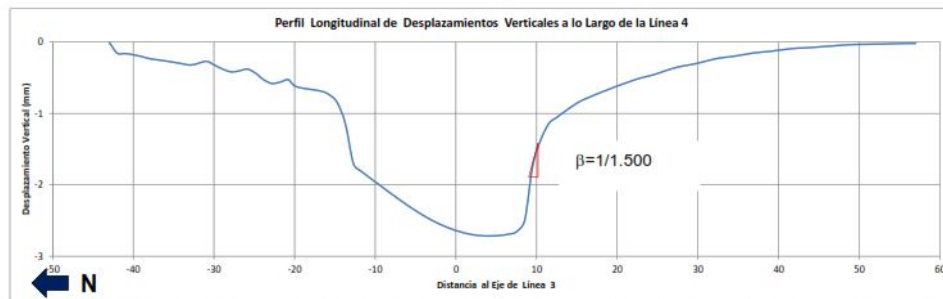


Figura 8.25: Distribución de asentamientos cruce Plaza Egaña

Estimación de Asentamiento Máximo Esperado	Rango de Variación Asentamiento Máximo	Rango de Distorsión Angular Máxima
mm	mm	
12	3 - 20	1/1.500-1/600

Figura 8.26: Asentamiento esperado y rango de variación cruce Plaza Egaña