



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

# **BACK ANALYSIS DEL MODELO NUMÉRICO UTILIZADO PARA EL DISEÑO DE LOS TÚNELES INTERESTACIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE SANTIAGO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL**

**SOFÍA BELÉN LAYERA DÍAZ**

PROFESOR GUÍA:  
JUAN CARLOS POZO ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA  
ROBERTO GESCHE SCHULER

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil  
**POR:** Sofía Layera Díaz  
**FECHA:** 14/05/2018  
**PROFESOR GUÍA:** Juan Carlos Pozo

## **BACK ANALYSIS DEL MODELO NUMÉRICO UTILIZADO PARA EL DISEÑO DE LOS TÚNELES INTERESTACIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE SANTIAGO**

Con motivo de la construcción de la extensión de la Línea 3 de Metro hacia Quilicura, surge la necesidad de estimar los parámetros geotécnicos de los suelos finos del noroeste de Santiago. Para realizar esta estimación se utiliza información asociada a los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago, en particular del sector norte. Esta información incluye datos sobre la geometría de los túneles, el método constructivo utilizado y los parámetros geotécnicos del suelo, además del monitoreo de deformaciones realizado durante la ejecución de las obras. Considerando estos datos es posible recrear el modelo numérico utilizado para el diseño de los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago. Para esto se utiliza FLAC3D, software que permite simular el comportamiento de estructuras subterráneas en tres dimensiones, y los modelos constitutivos para suelo: (a) Mohr-Coulomb y (b) Cysoil.

Luego, comparando las deformaciones obtenidas por el modelo numérico y los asentamientos superficiales registrados por el monitoreo, se corrobora la necesidad de realizar un *back analysis*. Considerando los dos modelos constitutivos, y un espectro de variaciones del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, se obtienen 4 configuraciones que logran representar el comportamiento real del suelo. Luego, realizando un análisis de sensibilidad se determina cómo afectan las variaciones de los parámetros geotécnicos a los resultados del modelo.

Cómo los registros de los puntos subsuperficiales obtenidos en monitoreo no fueron suficientes como para realizar un *back analysis*, esta información se utilizó para validar los parámetros geotécnicos ya estimados. A partir de las deformaciones subsuperficiales obtenidas con los modelos numéricos que consideran los parámetros geotécnicos ya estimados, se tiene que el modelo Mohr-Coulomb sobreestima en aproximadamente 10 [mm] las deformaciones reales del suelo, mientras que Cysoil, entrega un asentamiento 0,8 [mm] mayor al registrado en terreno.

Luego, se tiene que todos los modelos estimados logran representar el comportamiento del suelo en superficie, específicamente la zona que se encuentra justo sobre la excavación del túnel, mientras que sólo el modelo estimado para Cysoil, que considera aumento del 10% del módulo de elasticidad, logra reproducir las deformaciones reales producidas en los puntos subsuperficiales.

## **Agradecimientos**

A mi familia, por el apoyo y la paciencia. Por estar siempre para mí.

A mi pololo, por compartir conmigo todos estos años.

A mis amigos, a los de la vida, y a los que pasaron a ser parte de ésta durante mi paso por Beauchef. Todos los momentos compartidos hicieron de estos años, y del proceso de titulación, una linda experiencia.

A mi profesor guía, Juan Carlos Pozo, que me dio la oportunidad de trabajar con él. Gracias por el apoyo y la disposición.

A María Inés y a Wagner, que me dieron las herramientas para poder llevar a cabo este trabajo. Gracias por la ayuda y la paciencia.

A los profesores miembros de la comisión, Edgardo González y Roberto Gesche, por aceptar ser parte de este trabajo.

## Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.2.1.	Objetivo General.....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Metodología .....	3
2.	Marco Teórico .....	4
2.1.	Nuevo Método Austríaco para la Construcción de Túneles .....	4
2.2.	Asentamientos Superficiales Producto de la Excavación de Túneles .....	6
2.3.	Modelo Numérico en FLAC3D .....	10
2.4.	Modelos Constitutivos .....	14
2.4.1.	Mohr-Coulomb.....	14
2.4.2.	Cysoil.....	16
2.4.3.	Metodología de Transformación de Parámetros Geotécnicos desde Mohr-coulomb a Cysoil.....	18
3.	Antecedentes .....	21
3.1.	Línea 3 de Metro, Tramo en Estudio.....	21
3.2.	Estratigrafía.....	22
3.2.1.	Propiedades Geotécnicas.....	23
3.2.2.	Parámetros Geotécnicos .....	24
3.3.	Geometría .....	26
3.4.	Secuencia Constructiva.....	26
3.5.	Elementos Estructurales .....	30
3.6.	Instrumentación y Monitoreo .....	31
3.6.1.	Instrumentación.....	31
3.6.2.	Programa de Monitoreo.....	32
4.	Resultados Obtenidos a partir de Monitoreo .....	35
4.1.	Asentamientos Medidos en Superficie .....	35
4.1.1.	Curvas de Asentamientos Representativos .....	35
4.1.2.	Banda Representativa de Asentamientos.....	37
4.2.	Asentamientos Medidos en Puntos Subsuperficiales.....	38
5.	Modelo Numérico .....	40

5.1.	Modelo Numérico en FLAC3D .....	40
5.1.1.	Malla de Diferencias Finitas .....	40
5.1.2.	Condiciones de Borde .....	43
5.1.3.	Condiciones Iniciales .....	44
5.1.4.	Elección del Modelo Constitutivo .....	46
5.1.5.	Propiedades del Material .....	47
5.1.6.	Secuencia Constructiva .....	49
5.2.	Resultados e Interpretación .....	50
5.2.1.	Asentamientos Superficiales .....	50
5.2.2.	Asentamientos Subsuperficiales.....	54
6.	Back Analysis.....	56
6.1.	Back Analysis del Modelo Numérico .....	56
6.2.	Análisis de Sensibilidad.....	62
6.2.1.	Análisis de Sensibilidad para una Variable.....	63
6.2.2.	Análisis de Sensibilidad para dos Variables .....	66
6.3.	Análisis de Resultados .....	68
7.	Conclusiones.....	72
7.1.	Back Analysis y Análisis de Sensibilidad.....	72
7.2.	Validación de Modelos Estimados .....	73
7.3.	Conclusiones Finales .....	73
8.	Bibliografía .....	75
9.	ANEXOS .....	78
	ANEXO A: Determinación del Parámetro $\beta$ , Cysoil .....	78
	ANEXO B: Geometría de los Túneles Interestación .....	80
	ANEXO C: Secciones de Monitoreo en Planta .....	82
	ANEXO D: Curvas de Asentamiento Superficial.....	85
	ANEXO E: Variación de la Cohesión y del Ángulo de Fricción .....	90

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Sección típica para túneles pequeños, (Gacitúa, J., 2012) .....	4
Figura 2-2: Sección típica para túneles medianos, (Gacitúa, J., 2012) .....	5
Figura 2-3: Sección típica para túneles grandes, (Rey, M., 2016).....	5
Figura 2-4: Cubeta de asientos o de Attewell, (Oteo, C. y Rodríguez, J., 1998) .....	6
Figura 2-5: Asentamientos superficiales con el avance del frente de excavación, (Rodríguez, K., 2014) .....	7
Figura 2-6: Curva de asentamientos superficiales, según Peck, (Fattah et al., 2013).....	8
Figura 2-7: Punto de inflexión, según Peck, (Rodríguez, K., 2014).....	9
Figura 2-8: Esquema de cálculo de FLAC3D, (Lopez, J., 2002) .....	11
Figura 2-9: Procedimiento general para resolver un problema en FLAC3D, (ICG, 2013) .....	13
Figura 2-10: Modelo elastoplástico perfecto, Mohr-Coulomb, (Nieto et al., 2009).....	14
Figura 2-11: Superficie de fluencia, Mohr-Coulomb, (Nieto et al., 2009) .....	15
Figura 2-12: Relación entre los parámetros de Hardening Soil y Cysoil, (ICG, 2013)...	20
Figura 3-1: Plano red del Metro de Santiago, (Pozo, J., 2015).....	21
Figura 3-2:Detalle Línea 3 del Metro de Santiago, tramo 1 (ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A) .....	22
Figura 3-3: Carta geológica de Santiago, (Valenzuela, G., 1978) .....	23
Figura 3-4: Sección túnel interestación con contrabóveda, para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, E) .....	27
Figura 3-5: Secuencia constructiva, fase II, paso 14, (Pozo, J., 2015).....	29
Figura 3-6:Secuencia constructiva, fase II, paso 19, (Pozo, J., 2015).....	29
Figura 3-7: Secuencia constructiva, túnel interestación con contrabóveda, para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, E).....	30
Figura 3-8: Secciones de control para los tramos A y B de la Línea 3: (a) Sección con nivel de control medio (b) Sección con nivel de control alto (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A).....	33
Figura 4-1: Curva de asentamiento superficial representativo, sección T1C1-A .....	36
Figura 4-2: Curva de asentamiento superficial representativo, sección T4C1-A .....	37
Figura 4-3: Banda representativa de asentamientos superficiales, sección T1C1-A.....	37
Figura 4-4: Banda representativa de asentamientos superficiales, sección T4C1-A.....	38
Figura 5-1: Malla de diferencias finitas, Phase2.....	41
Figura 5-2: Malla de diferencias finitas, FLAC3D .....	42
Figura 5-3: Condiciones de borde, FLAC3D .....	43
Figura 5-4: Estado de tensiones iniciales en el eje Z, FLAC3D .....	45

Figura 5-5: Estado de tensiones iniciales en el eje X, FLAC3D .....	46
Figura 5-6: Excavación del túnel, FLAC3D .....	50
Figura 5-7: Asentamientos superficiales en metros, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A, FLAC3D .....	51
Figura 5-8: Curva de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A.....	51
Figura 5-9: Comparación curvas de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A.....	52
Figura 5-10: Comparación curvas de asentamiento superficial, Cysoil, sección T1C1-A .....	53
Figura 5-11: Comparación curvas de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T4C1-A.....	53
Figura 5-12: Comparación curvas de asentamiento superficial, Cysoil, sección T4C1-A .....	54
Figura 5-13: Deformaciones alrededor del túnel, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A, FLAC3D .....	55
Figura 6-1: Back anlysis para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A.....	57
Figura 6-2: Back anlysis para Cysoil, sección T1C1-A.....	58
Figura 6-3: Detalle del back anlysis de Cysoil, sección T1C1-A.....	59
Figura 6-4: Back anlysis para Mohr-Coulomb, sección T4C1-A.....	60
Figura 6-5: Back anlysis para Cysoil, sección T4C1-A.....	61
Figura 6-6 Detalle del back anlysis de Cysoil, sección T4C1-A.....	61
Figura 6-7: Análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad, Mohr-Coulomb.....	63
Figura 6-8: Análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad, Cysoil.....	64
Figura 6-9: Análisis de sensibilidad para el coeficiente de empuje en reposo, Mohr-Coulomb.....	65
Figura 6-10: Análisis de sensibilidad para el coeficiente de empuje en reposo, Cysoil.....	65
Figura 9-1: Calibración ensayo triaxial drenado, primer estrato .....	78
Figura 9-2: Calibración ensayo triaxial drenado, segundo estrato.....	79
Figura 9-3: Geometría túnel interestación, sección T1C1-A.....	80
Figura 9-4: Geometría túnel interestación, sección T4C1-A.....	81
Figura 9-5: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+171 .....	85
Figura 9-6: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+232.....	85
Figura 9-7: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+253.....	86
Figura 9-8: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+278.....	86
Figura 9-9: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+988.....	87
Figura 9-10: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+017 .....	87

Figura 9-11: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+067 .....	88
Figura 9-12: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+167 .....	88
Figura 9-13: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+262 .....	89
Figura 9-14: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+313 .....	89
Figura 9-15: Variación de la Cohesión para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A .....	90
Figura 9-16: Variación de la Cohesión para Cysoil, sección T1C1-A .....	90
Figura 9-17: Variación del ángulo de fricción para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A .....	91
Figura 9-18: Variación del ángulo de fricción para Cysoil, sección T1C1-A .....	91

## Índice de Tablas

Tabla 2-1:Punto de inflexión, (Rodríguez, K., 2014).....	10
Tabla 2-2: Parámetros del modelo Mohr-Coulomb.....	16
Tabla 2-3: Parámetros del modelo Cysoil .....	18
Tabla 3-1: Propiedades geotécnicas, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, B).....	24
Tabla 3-2: Coeficientes de empuje en reposo recomendados para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, B) .....	24
Tabla 3-3: Parámetros geotécnicos, modelo Mohr-Coulomb .....	25
Tabla 3-4: Parámetros geotécnicos, modelo Cysoil .....	25
Tabla 3-5:Características de las secciones T1C1-A y T4C1-A.....	26
Tabla 3-6: Parámetros de diseño hormigón estructural, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2016) .....	31
Tabla 3-7:Secciones de control tramo 1, Línea 3 de Metro, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A).....	34
Tabla 4-1:Secciones de monitoreo .....	35
Tabla 4-2: Valores ajustados para las curvas de asentamiento .....	36
Tabla 4-3: Asentamiento medido en punto subsuperficial .....	38
Tabla 5-1:Dimensiones de la malla .....	42
Tabla 5-2: Asentamientos superficiales según modelo numérico.....	52
Tabla 5-3: Asentamientos en puntos subsuperficiales .....	55
Tabla 6-1: Back analysis para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A .....	56
Tabla 6-2: Back anlysis para Cysoil, sección T1C1-A.....	57
Tabla 6-3: Back anlysis para Mohr-Coulomb, sección T4C1-A .....	59
Tabla 6-4: Back anlysis para Cysoil, sección T4C1-A .....	60
Tabla 6-5: Back anlysis para Mohr-Coulomb y Cysoil .....	62
Tabla 6-6: Variación de la cohesión .....	69
Tabla 6-7: Variación del ángulo de fricción .....	69
Tabla 6-8: Modelos estimados .....	70
Tabla 6-9: Asentamientos en puntos subsuperficiales .....	70
Tabla 7-1: Modelos estimados .....	73
Tabla 9-1:Sección de monitoreo.....	82

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

El Metro de Santiago permite realizar más de 2,5 millones de viajes diariamente, por lo que la construcción de nuevas líneas de Metro implica una mejora directa en el sistema de transporte de la ciudad de Santiago. El Metro de Santiago se encuentra constantemente en expansión; el año 2017 entró en operación la Línea 6, y se espera que este año comience a operar la Línea 3, permitiendo conectar el norte de la ciudad de Santiago con el centro y el sector oriente. Además, cabe destacar que en 2017 se anunció la construcción de la futura Línea 7 de Metro, la que iniciará sus estudios básicos en 2018.

Aumentar la cantidad de líneas de Metro implica el desarrollo de grandes y complejas obras de ingeniería, como lo son los túneles, cuya construcción debe alterar lo menos posible el desarrollo normal de la ciudad. Es por esta razón que, según Casares (2004), desde 1994 el Metro de Santiago lleva a cabo la construcción de sus túneles siguiendo el criterio del Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM), el cual consiste en la excavación secuencial de la sección transversal del túnel, seguida cíclicamente de la instalación inmediata del sostenimiento, otorgando al terreno el confinamiento suficiente para que éste pueda participar activamente en la función portante.

Debido a la construcción de la extensión de la Línea 3 de Metro, y el requisito de utilizar el terreno como parte del sistema de soporte, surge la necesidad de estimar los parámetros geotécnicos de los suelos finos del noroeste, específicamente, de aquellos suelos en dónde se está construyendo la Línea 3. Para esto se desarrollará un modelo numérico en FLAC3D, capaz de simular el proceso de excavación de los túneles y predecir el comportamiento de los suelos. Además, se considerarán dos modelos constitutivos, Mohr Coulomb y Cysoil, que según Arenas y Viertel (2010) permiten simular con diferentes niveles de precisión el comportamiento del suelo, ya que cada uno considera diferentes parámetros geotécnicos relacionados con la resistencia y la rigidez de éste.

Para realizar el *back analysis*, se considerarán variaciones del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo. Además, es necesario contar con una serie de antecedentes relacionados con la obra, cómo la geometría de los túneles, la secuencia constructiva, y los asentamientos superficiales obtenidos de monitoreo. Cabe destacar que estos datos serán facilitados por ARCADIS, empresa que ha participado en los estudios y diseños de varias líneas del Metro de Santiago, y últimamente en el diseño y la construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo general del trabajo de título es realizar un *back analysis* del modelo numérico utilizado para el diseño de los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

El trabajo de título cuenta con cuatro objetivos específicos.

- 1) Recopilar datos sobre la geometría de los túneles y los parámetros geotécnicos del suelo, además de los datos de monitoreo de deformaciones registrados durante la construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago.
- 2) Realizar un modelo numérico que represente las deformaciones y los esfuerzos internos producto de la construcción de los túneles de la Línea 3.
- 3) Considerando las deformaciones reales del suelo, realizar un ajuste del modelo mencionado anteriormente y corregir los parámetros geotécnicos.

## **1.3. Alcances**

Los alcances de esta memoria son la estimación de los parámetros geotécnicos de los suelos finos del noroeste de Santiago, específicamente, los suelos en dónde se construyó la Línea 3 de Metro. Para ello, se compararán las deformaciones reales del suelo obtenidas a partir de monitoreo, con las deformaciones calculadas por un modelo de diferencias finitas tridimensional creado en FLAC3D.

## 1.4. Metodología

A continuación, se presenta la metodología a seguir.

- 1) Revisión bibliográfica referente a los siguientes temas:
  - Método constructivo:  
El Metro de Santiago lleva a cabo la construcción de sus túneles siguiendo el criterio del Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM), por lo que es necesario conocer este método a cabalidad.
  - Asentamientos superficiales:  
La construcción de túneles provoca deformaciones en superficie, por lo que se estudiarán diferentes métodos de análisis, de origen empírico, que permiten estimar los asentamientos superficiales.
  - Modelos constitutivos:  
Los modelos constitutivos permiten representar el comportamiento del suelo, por lo que se estudiarán los modelos Mohr Coulomb y Cap Yield Soil de FLAC3D.
- 2) Estudio del software FLAC3D (Itasca), el cual permite simular el comportamiento de estructuras subterráneas en tres dimensiones, incluyendo suelo, roca y otros materiales con deformación plástica. Para comprender a cabalidad el software, se estudiarán los tutoriales y el manual de FLAC3D. Además, se contará con el apoyo de los ingenieros de ARCADIS expertos en modelación geotécnica.
- 3) Recopilación de antecedentes geométricos y monitoreo de deformaciones de los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago, específicamente, de los túneles embebidos en los suelos finos del noroeste de Santiago. Estos antecedentes serán facilitados por ARCADIS, empresa que ha participado en el diseño, construcción y monitoreo de la Línea 3.
- 4) Realizar un modelo geotécnico capaz de predecir las deformaciones y los esfuerzos internos del revestimiento de los túneles en estudio.
- 5) Comparar las deformaciones que se obtienen del modelo con las obtenidas en el monitoreo de deformaciones, con tal de estimar los parámetros geotécnicos (*'back analysis'*).

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Nuevo Método Austríaco para la Construcción de Túneles

Según González et al. (2017) desde 1993 el Metro de Santiago lleva a cabo la construcción de sus túneles siguiendo el criterio del Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM), ya que permite realizar una construcción más económica, flexible y rápida, minimizando la intervención en superficie.

NATM es un método semi-empírico desarrollado originalmente para rocas a partir de los estudios de Rabcewicz (1964) y los conceptos de convergencia y confinamiento desarrollados por Fenner y Pacher (Gacitúa, J., 2012). Uno de los principios de este método es considerar el terreno como parte del sistema de soporte, para esto se requiere utilizar sostenimientos iniciales flexibles y métodos de excavación que minimicen las deformaciones del terreno. Esto último se logra considerando una secuencia constructiva con avances pequeños y un sostenimiento lo suficientemente resistente (Austrian Society for Geomechanics, 2010).

Para determinar el tamaño de los avances de la secuencia de excavación, Gacitúa (2012) clasifica los túneles según su tamaño. Túneles pequeños, de hasta  $50 m^2$ , se pueden ejecutar a sección completa o dividiendo el frente de excavación en bóveda y banco, mientras que, para túneles de sección mediana, entre  $50 m^2$  y  $100 m^2$ , es necesario dividir la sección en bóveda, banco y contrabóveda. Por otra parte, para túneles con secciones mayores a  $100 m^2$ , se consideran dos galerías laterales y un núcleo central, por lo que se divide la bóveda, el banco y la contrabóveda en subsecciones. A continuación, se presentan las secciones del frente de excavación típicas para túneles pequeños, medianos y grandes.

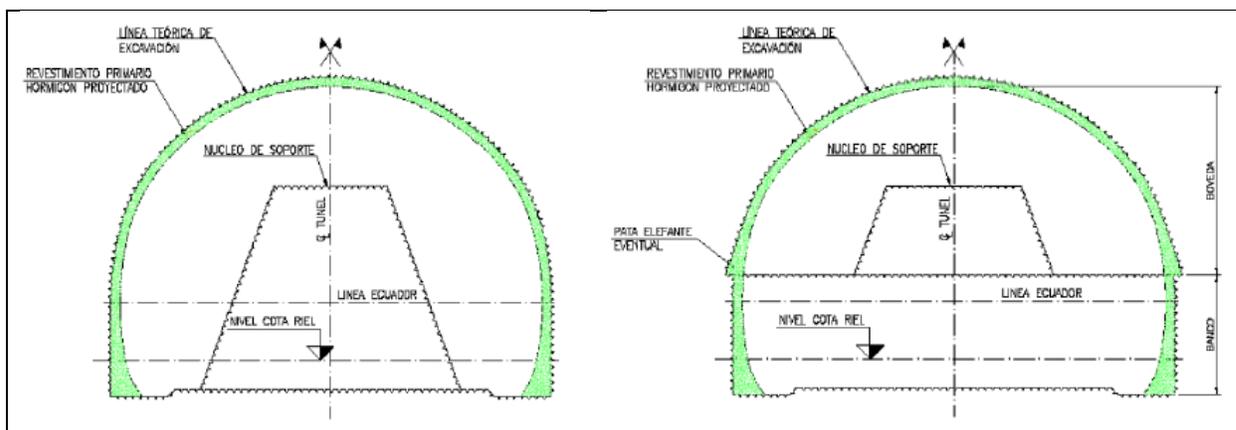


Figura 2-1: Sección típica para túneles pequeños, (Gacitúa, J., 2012)

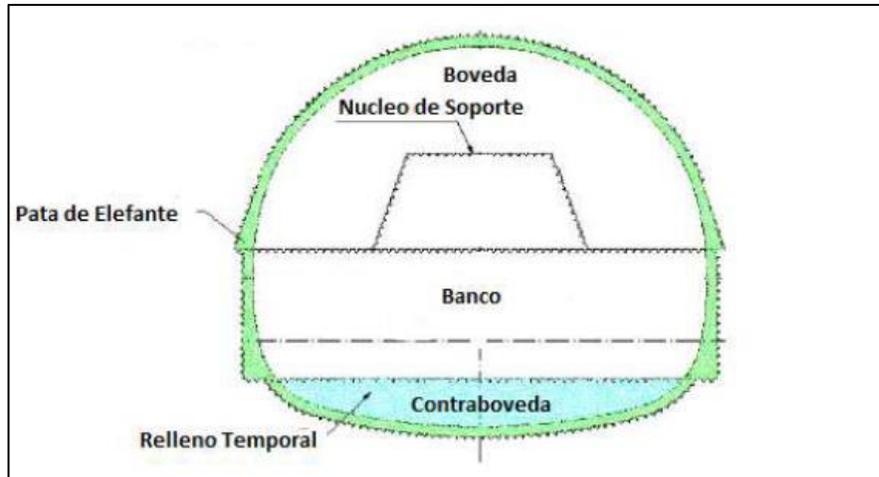


Figura 2-2: Sección típica para túneles medianos, (Gacitúa, J., 2012)

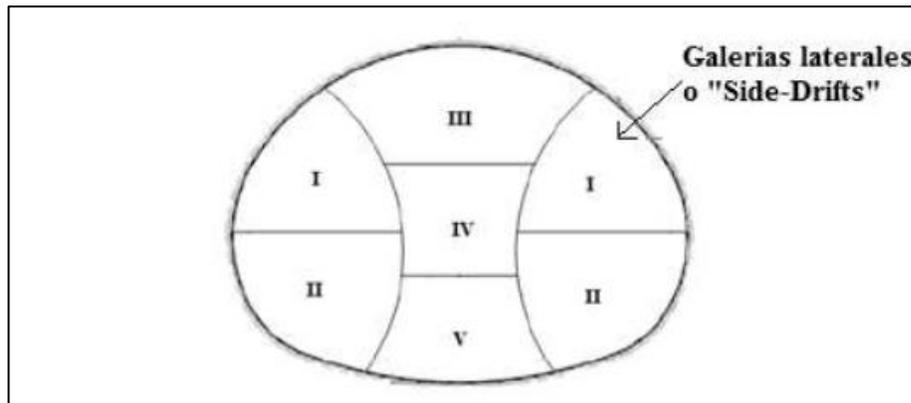


Figura 2-3: Sección típica para túneles grandes, (Rey, M., 2016)

Cabe destacar que, los avances que se realizan en el frente de excavación siguen un orden, el cual se inicia con la parte superior del frente, o bóveda, y termina con la parte inferior, pudiendo ser esta, banco o contrabóveda, para túneles con secciones pequeñas o medianas. Por otra parte, para túneles con secciones grandes la secuencia de excavación sigue el orden presentado en la Figura 2-3, el cual comienza con las galerías laterales y termina con el núcleo central del túnel, siguiendo el orden de los números romanos.

## 2.2. Asentamientos Superficiales Producto de la Excavación de Túneles

La excavación de túneles provoca deformaciones en la superficie, debido principalmente a una redistribución de esfuerzos y al efecto de la consolidación. Las deformaciones provocadas tienden a cerrarse en torno a la excavación, por lo que se tienen desplazamientos radiales en dirección al túnel. En otras palabras, las deformaciones poseen una componente vertical, conocida como asentamiento, y dos componentes horizontales, a menudo despreciadas. En definitiva, se deben tener en cuenta tres dimensiones, que en conjunto generan la cubeta de asientos (Figura 2-4), más una cuarta dimensión, el tiempo, que influye en la magnitud de la relajación total que va experimentando el terreno (Oteo, C. y Rodríguez, J., 1998).

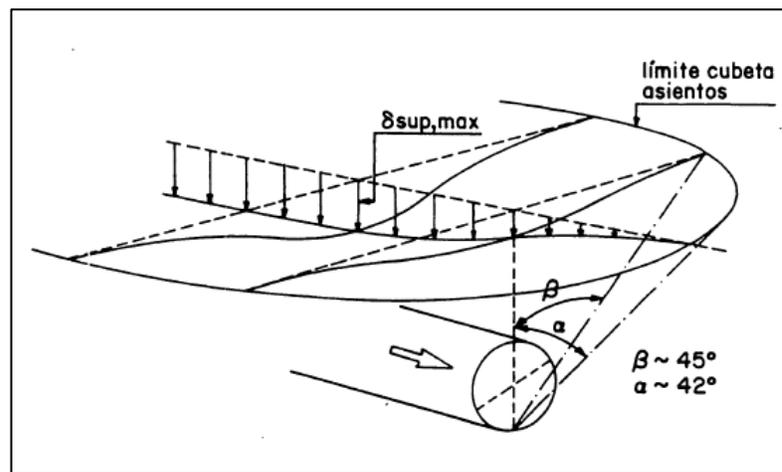


Figura 2-4: Cubeta de asientos o de Atterwell, (Oteo, C. y Rodríguez, J., 1998)

Con respecto a las deformaciones provocadas por la excavación de túneles, se ha demostrado empíricamente que a medida que avanza la excavación de un túnel, el movimiento en superficie se inicia varios metros antes de la llegada del frente de excavación. En la Figura 2-5 se presenta un esquema que muestra este comportamiento, llegando a alcanzar, en el punto **a**, entre un 20% y un 30% de la deformación total, mientras que pasado el frente de excavación (punto **b**) se presentan deformaciones entre un 50% y un 60% de la deformación total. Luego, a medida que continúa la excavación y esta finaliza, el asentamiento se va manteniendo constante, llegando así a su valor máximo (Rodríguez, K., 2014).

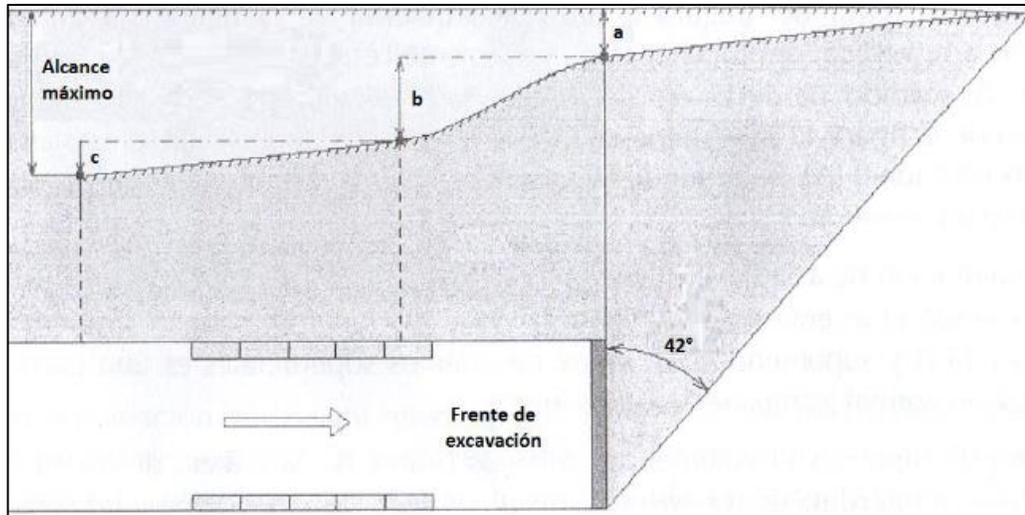


Figura 2-5: Asentamientos superficiales con el avance del frente de excavación, (Rodríguez, K., 2014)

Estimar el asentamiento máximo en superficie producto de la excavación de un túnel puede ser bastante complejo, sin embargo, en esta sección se presentan los métodos más utilizados para su estimación, basados principalmente en observaciones hechas en campo. Cabe destacar que, a pesar de la sencillez de estos métodos, su uso permite estimar en forma aproximada los asentamientos superficiales.

La primera aproximación de la subsidencia, según Rodríguez (2014) fue descrita por Schmidt (1969), quien asemeja la superficie de asentamientos a una campana de Gauss invertida. Peck (1969) mediante observaciones hechas en campo relacionó deformaciones y distancias, y obtuvo una curva que describe los asentamientos producto de la excavación de un túnel (Figura 2-6). A continuación, se presenta la expresión que describe dicha curva, donde  $x_i$  es la distancia al punto de inflexión desde el eje central del túnel,  $\delta(x)$  el asentamiento máximo medido en superficie a una distancia  $x$  del eje y  $\delta_{m\acute{a}x}$  el asentamiento máximo medido en superficie sobre el eje central del túnel.

$$\delta(x) = \delta_{m\acute{a}x} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2x_i^2}\right)} \quad (1)$$

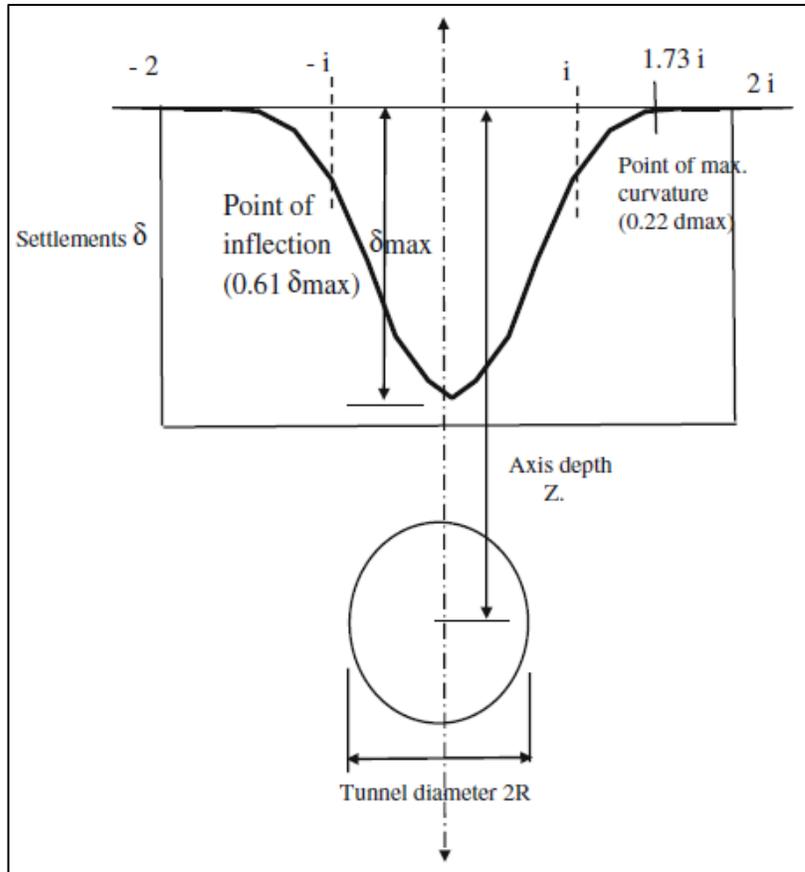


Figura 2-6: Curva de asentamientos superficiales, según Peck, (Fattah et al., 2013)

Luego, para determinar la curva de asentamientos, es necesario calcular el asentamiento máximo medido en superficie sobre el eje central del túnel y el punto de inflexión. A continuación, se presentan diferentes formas de obtener estos parámetros.

### a) Cálculo del asentamiento máximo

Peck propone calcular el asentamiento máximo sobre el eje central del túnel con la Ecuación (2), donde  $V_s$  representa la pérdida de volumen de suelo en superficie inducida por la excavación del túnel, y  $x_i$  es la distancia desde el eje central del túnel al punto de inflexión.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot x_i} \quad (2)$$

Por otra parte, Oteo y Sagaseta (1982) proponen calcular el asentamiento máximo utilizando la Ecuación (3), siempre y cuando se trate de un túnel de sección circular, sin revestimiento, para un suelo homogéneo, isotrópico, lineal y elástico.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{(0,85 - \nu) \cdot \gamma \cdot D^2}{E} \quad (3)$$

Esta expresi3n permite determinar el asentamiento máximo a partir del diámetro de túnel,  $D$ , y del peso unitario del suelo,  $\gamma$ , además de los parámetros de deformaci3n del suelo, el m3dulo de elasticidad,  $E$ , y el coeficiente de Poisson,  $\nu$ .

### b) Cálculo del punto de inflexi3n

El punto de inflexi3n se define como aquel punto d3nde la funci3n cambia de concavidad (Figura 2-6,  $i$ ).

Peck propuso determinar el punto de inflexi3n,  $x_i$ , a partir de la profundidad del túnel,  $z$ , su radio,  $a$ , y del tipo de suelo. Del gráfico de la Figura 2-7, determinado por Peck a partir de datos experimentales, es posible obtener el punto de inflexi3n, para esto es necesario conocer el valor de la profundidad relativa ( $z/2a$ ) y el tipo de suelo.

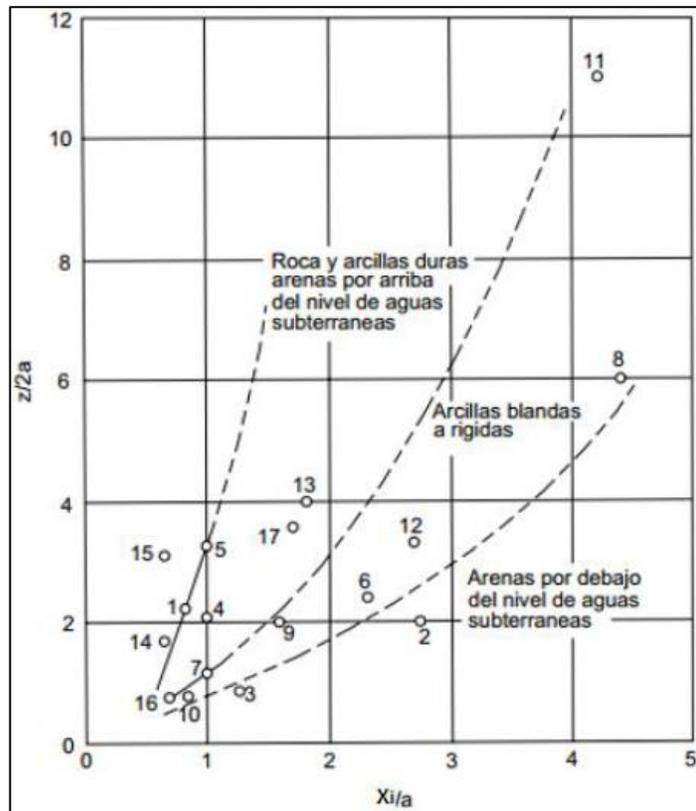


Figura 2-7: Punto de inflexi3n, según Peck, (Rodríguez, K., 2014)

Sagaseta y Oteo (1974) tambi3n propusieron una expresi3n para determinar el punto de inflexi3n. Ésta se presenta en la Ecuaci3n (4), d3nde  $a$  es el radio del túnel, y  $\eta$

es un coeficiente de dispersión que varía entre 0,7, para materiales rígidos, y 1,3 para materiales poco resistentes.

$$\frac{x_i}{a} = \eta \left( 1,05 \cdot \frac{z}{2a} - 0,42 \right) \quad (4)$$

Por otra parte, a partir de estudios realizados en Reino Unido, por O'Reilly (1982) y New (1991) se establecieron expresiones que permiten determinar el valor del punto de inflexión, dependiendo del tipo de suelo y de la profundidad del túnel. A continuación, en la Tabla 2-1 se presentan ambas expresiones.

**Tabla 2-1: Punto de inflexión, (Rodríguez, K., 2014)**

Tipo de suelo	Punto de inflexión [m]
Suelo cohesivo	$x_i = 0,43 \cdot z + 1,1$
Suelo no cohesivo (granular)	$x_i = 0,28 \cdot z + 0,12$

Cabe destacar que, las expresiones anteriores son válidas siempre y cuando la profundidad desde la superficie hasta el eje central del túnel se encuentre entre 3 y 34 [m], para suelos cohesivos, y entre 6 y 10 [m] para suelos no cohesivos.

Sin bien existe un gran número de expresiones que permiten calcular el punto de inflexión, actualmente la más utilizada es la propuesta por Rankin (1988).

$$x_i = k \cdot z \quad (5)$$

Esta expresión permite determinar el punto de inflexión a partir de la profundidad del túnel y de una constante adimensional,  $k$ , cuyo valor depende del tipo de suelo. Para simplificar el uso de esta expresión se recomienda asumir  $k = 0,4$  para arcillas rígidas y  $k = 0,7$  para arcillas limosas blandas.

### 2.3. Modelo Numérico en FLAC3D

Según Piaggio (2015) la modelación con software de análisis numérico es la herramienta más avanzada para simular, con diferentes niveles de sofisticación, el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos. Algunas de las ventajas que trae trabajar con este tipo de software son:

- Permite estimar los esfuerzos del terreno, soporte y fortificación.
- Se pueden modelar secciones de cualquier geometría.
- El tiempo de cálculo es razonable, y puede ser controlado.

- Se pueden incluir todos los elementos de fortificación que se deseen.
- Se puede simular el proceso constructivo, definiendo etapas de avance.
- Es posible variar los parámetros del suelo, realizar calibraciones y análisis de sensibilidad.
- Se pueden modelar diferentes configuraciones, combinaciones entre túneles y piques.
- Se puede incluir el efecto del agua, cargas dinámicas, cargas externas debido a estructuras, etc.

Uno de los softwares de análisis numérico más completos y utilizados para el análisis geotécnico es FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua). Este software permite simular el comportamiento de estructuras subterráneas en tres dimensiones, incluyendo suelo, roca y otros materiales con deformación plástica.

FLAC3D se basa en el método de diferencias finitas (FDM) para la resolución de ecuaciones diferenciales. Para esto primero se debe discretizar el medio a modelar, creando una malla compuesta por zonas, cuadriláteros, cuyos nodos permiten representar la interacción entre estas zonas (Castro, C., 2015).

El FDM permite obtener una solución a partir del cálculo, balance de fuerzas y desplazamientos nodales, haciendo un cálculo explícito nodo a nodo de las ecuaciones de movimiento. Básicamente, el esquema de cálculo corresponde a un método cíclico (Figura 2-8), el cual se produce, cómo se mencionó anteriormente, en cada nodo y para cada uno de los pasos de cálculo, de manera independiente.

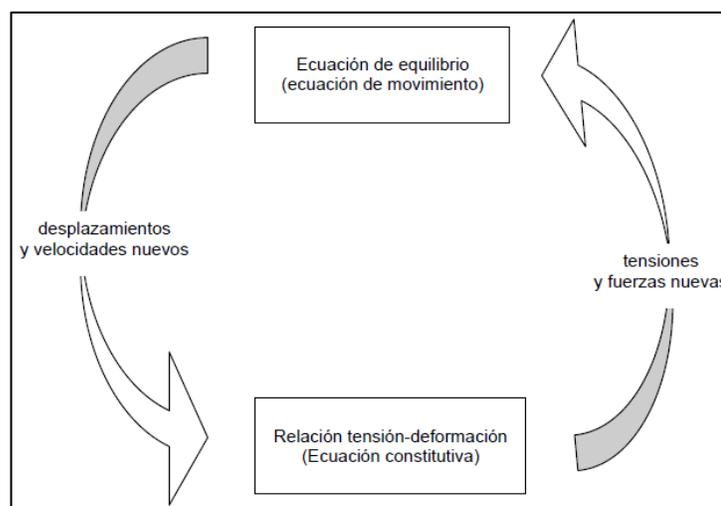


Figura 2-8: Esquema de cálculo de FLAC3D, (Lopez, J., 2002)

Por otra parte, según Itasca Consulting Group (ICG, 2013) para lograr definir un modelo numérico en FLAC3D se deben especificar tres componentes fundamentales:

1. La malla de diferencias finitas
2. El comportamiento constitutivo y las propiedades de los materiales
3. Las condiciones iniciales y de borde

La malla de diferencias finitas permite definir la geometría del problema, mientras que el comportamiento constitutivo y las propiedades de los materiales definirán el tipo de respuesta que el modelo presentará frente a una perturbación. Por otra parte, las condiciones iniciales y de borde permiten definir el estado in-situ del modelo.

Ya definidos los tres componentes fundamentales, es posible calcular el equilibrio inicial del problema. Luego, se puede alterar el modelo, con tal de incluir los cambios a los que se verá expuesto, como excavaciones o cambios en las condiciones de borde del modelo, para luego calcular su respuesta frente a estas alteraciones.

Como se mencionó anteriormente, FLAC3D permite obtener una solución a partir del cálculo de cada nodo y para cada paso computacional. El número de pasos requerido para obtener una solución puede ser controlado automáticamente o manualmente, sin embargo, queda a criterio del usuario determinar si el número de pasos es suficiente para lograr obtener una solución adecuada.

A continuación, se presenta el procedimiento general para resolver un problema en FLAC3D.

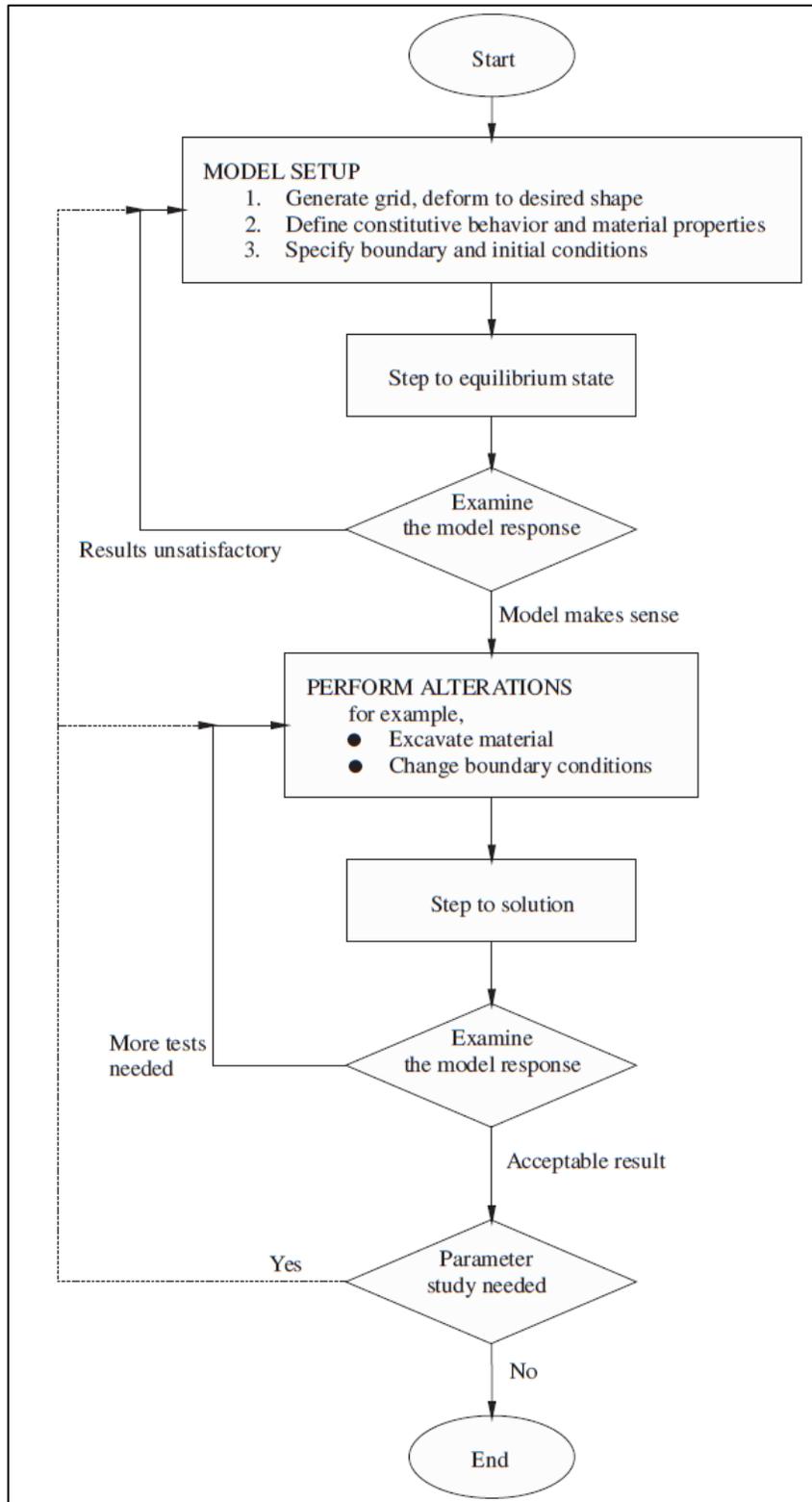


Figura 2-9: Procedimiento general para resolver un problema en FLAC3D, (ICG, 2013)

## 2.4. Modelos Constitutivos

Una parte importante del análisis numérico se relaciona con los modelos constitutivos utilizados para representar el comportamiento del suelo. La elección de un modelo constitutivo apropiado permitirá obtener predicciones que se acerquen más al comportamiento real del suelo. Es por esta razón que se estudiarán dos modelos constitutivos, además de la metodología que permite la obtención de los parámetros geotécnicos para Cysoil a partir de Mohr-Coulomb.

### 2.4.1. Mohr-Coulomb

Según Nieto et al. (2009), el modelo constitutivo Mohr-Coulomb es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Se trata de un modelo elastoplástico perfecto desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y el criterio de falla Mohr-Coulomb.

El modelo no permite representar el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que es un modelo elástico y luego plástico perfecto (Figura 2-10). La formulación del modelo involucra dos elementos, la elasticidad perfecta y la plasticidad asociada al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles.

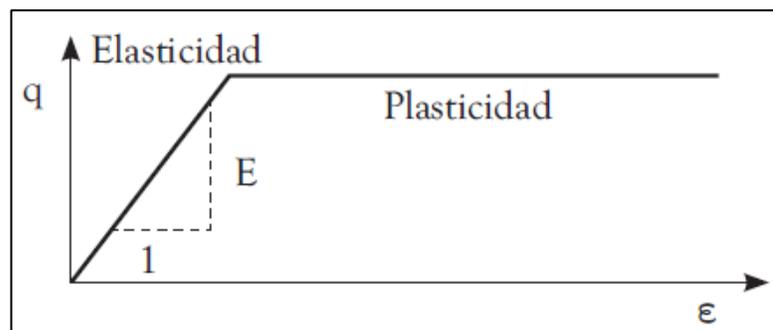


Figura 2-10: Modelo elastoplástico perfecto, Mohr-Coulomb, (Nieto et al., 2009)

Para determinar si un material posee un comportamiento elástico o plástico, Mohr-Coulomb cuenta con un conjunto de funciones de fluencia,  $f$ , que definen el límite entre ambos comportamientos. La Figura 2-11 muestra la representación gráfica de las funciones de fluencia en el espacio de los esfuerzos principales, las cuales forman una superficie fija. Luego, aquellos estados de esfuerzos representados dentro de la superficie presentan un comportamiento netamente elástico, mientras que aquellos que igualan o superan la frontera definida por la superficie, presentan tanto deformaciones elásticas como plásticas.

Este criterio de fluencia es definido a partir de seis funciones formuladas en términos de esfuerzos principales.

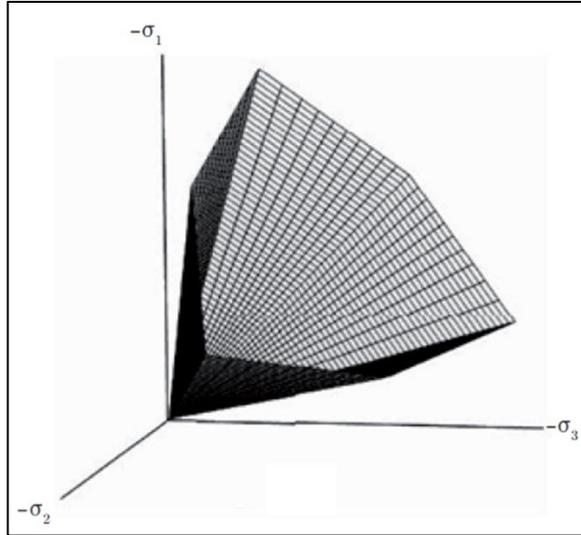


Figura 2-11: Superficie de fluencia, Mohr-Coulomb, (Nieto et al., 2009)

El comportamiento elastoplástico perfecto es formulado a partir de la relación entre dos tipos de deformaciones, la elástica y la plástica, mediante la aplicación de la ley de Hooke, donde  $\varepsilon$  representa la deformación total, compuesta por una deformación elástica y una plástica,  $\sigma'$  los esfuerzos principales, y  $D^e$  la matriz de rigidez elástica.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad (5)$$

$$\dot{\sigma}' = D^e \dot{\varepsilon}^e \quad (6)$$

Sin embargo, como la teoría de plasticidad asociada a esta relación tiende a sobreestimar el fenómeno de dilatación del material, el modelo Mohr-Coulomb incorpora un conjunto de funciones potenciales,  $g$ .

A partir de esta consideración, las deformaciones plásticas se definen en la Ecuación (7), donde el multiplicador plástico  $\lambda$  define el tipo de comportamiento del material, asumiendo valores nulos cuando el comportamiento es netamente elástico, y valores positivos cuando el comportamiento es plástico.

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (7)$$

De esta forma, la formulación del modelo exige seis parámetros de entrada. A continuación, en la Tabla 2-2, se presentan estos parámetros.

Tabla 2-2: Parámetros del modelo Mohr-Coulomb

Parámetro	Descripción
$\gamma$	Densidad
$\phi$	Ángulo de fricción
$\psi$	Ángulo de dilatación
$c$	Cohesión
$E$	Módulo de elasticidad
$\nu$	Coefficiente de Poisson

## 2.4.2. Cysoil

Según Villanueva (2015) el modelo Cysoil es un modelo constitutivo de esfuerzo-endurecimiento, caracterizado por el criterio de falla Mohr-Coulomb. El comportamiento elástico es expresado usando la ley de Hooke. La expresión incremental de la ley se presenta en términos de esfuerzos principales y deformación.

A diferencia del modelo elastoplástico perfecto, la superficie de fluencia del modelo no es fija en el espacio de los esfuerzos principales, pudiendo expandirse debido a deformaciones plásticas.

El comportamiento del modelo puede ser ajustado para diferentes características del comportamiento de suelos a través de la selección de leyes de endurecimiento. La ley límite-endurecimiento permite capturar el comportamiento volumétrico del material, la ley fricción-endurecimiento, permite reproducir el comportamiento hiperbólico esfuerzo vs deformación observado en pruebas triaxiales drenadas, y la ley dilatación-endurecimiento sirve para modelar el esfuerzo volumétrico irreversible producto del corte del suelo.

A continuación, se detallan las tres leyes de endurecimiento, según ICG (2013).

### a) Ley límite-endurecimiento (*cap hardening*)

El comportamiento volumétrico observado en pruebas de consolidación isotrópica se representa mediante la Ecuación (8).

$$\frac{\partial p'}{\partial e} = K_{ref}^{iso} \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^m \quad (8)$$

Dónde  $e$  es la deformación volumétrica,  $p'$  la presión efectiva,  $p_{ref}$  la presión de referencia,  $K_{ref}^{iso}$  el módulo de rigidez elástico de referencia, y  $m$  una constante, cuyo valor es menor a uno.

Luego, considerando la relación entre la presión límite y la deformación volumétrica plástica; y la relación entre el módulo de rigidez elástico y el módulo de endurecimiento,  $R = K^e/H$ , se obtiene la expresión que representa el comportamiento del módulo de rigidez elástico.

$$K^e = (1 + R)K_{ref}^{iso} \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^m \quad (9)$$

### b) Ley fricción-endurecimiento (*friction hardening*)

Para incorporar la ley fricción-endurecimiento, el modelo adopta la siguiente expresión.

$$\partial(\sin \phi_m) = \frac{G^p}{p'} \partial(\gamma^p) \quad (10)$$

Dónde  $\phi_m$  es el ángulo de fricción movilizado,  $p'$  la presión efectiva,  $\gamma^p$  la deformación plástica al corte, y  $G^p$  el módulo de corte plástico, el cual se obtiene a partir de la Ecuación (11).

$$G^p = \beta G^e \left( 1 - \frac{\sin \phi_m}{\sin \phi_f} R_f \right)^2, \quad \text{con } \phi_m \leq \phi_f \quad (11)$$

En esta expresión  $\phi_f$  es el ángulo de fricción último,  $\beta$  un factor de calibración,  $R_f$  la razón de falla, y  $G^e$  es el módulo de corte elástico.

$$G^e = G_{ref}^e \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^m \quad (12)$$

Con  $G_{ref}^e$  el módulo de corte elástico de referencia para una presión de referencia  $p_{ref}$ , y  $m$  una constante, cuyo valor puede ser igual o menor a uno.

### c) Ley dilatación-endurecimiento (*dilatation hardening*)

Esta ley se utiliza para modelar el esfuerzo volumétrico irreversible producto del corte del suelo. Para lograr representar este comportamiento, se calcula el ángulo de dilatación movilizado,  $\psi_m$ .

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \phi_m - \sin \phi_{cv}}{1 - \sin \phi_m \sin \phi_{cv}} \quad (13)$$

Con,

$$\sin \phi_{cv} = \frac{\sin \phi_f - \sin \psi_f}{1 - \sin \phi_f \sin \psi_f} \quad (14)$$

Dónde  $\phi_m$  es el ángulo de fricción movilizado,  $\phi_f$  el ángulo de fricción último,  $\psi_f$  el ángulo de dilatación último, y  $\phi_{cv}$  una constante volumétrica que define el comportamiento del material, ya que, si su valor es mayor al ángulo de fricción movilizado, el suelo presenta un comportamiento contractivo, mientras que, si su valor es menor, el material tiende a dilatarse.

Luego, la formulación del modelo exige doce parámetros de entrada. A continuación, en la Tabla 2-3, se presentan estos parámetros.

**Tabla 2-3: Parámetros del modelo Cysoil**

Parámetro	Descripción
$\gamma$	Densidad
$\phi$	Ángulo de fricción
$\psi$	Ángulo de dilatación
$c$	Cohesión
$G_{ref}^e$	Módulo de corte elástico de referencia
$K_{ref}^e$	Módulo volumétrico elástico de referencia
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$m$	Potencia
$p_{ref}$	Presión de referencia
$R$	Multiplicador
$R_f$	Relación de falla
$\beta$	Factor de calibración

### 2.4.3. Metodología de Transformación de Parámetros Geotécnicos desde Mohr-coulomb a Cysoil

El modelo constitutivo Mohr-Coulomb es el modelo básico más utilizado en la práctica geotécnica, ya que es común contar con los parámetros geotécnicos que lo definen. Sin embargo, es incapaz de reproducir adecuadamente los cambios de rigidez del suelo y modelar situaciones donde se experimentan diferentes trayectorias de esfuerzos son experimentadas.

Como comúnmente se dispone de los parámetros geotécnicos asociados al modelo Mohr-Coulomb, se presenta la metodología de transformación que permite determinar los parámetros del modelo Cysoil. Para esto se utilizará un modelo constitutivo auxiliar, Hardening Soil, de Plaxis (programa computacional que utiliza el

método numérico de elementos finitos para el cálculo de problemas geotécnicos), permitiendo dividir la metodología de transformación en dos partes.

### a) Metodología de transformación desde Mohr-Coulomb a Hardening Soil

El modelo Hardening Soil, o de suelo con endurecimiento isotrópico, es un modelo avanzado capaz de simular el comportamiento de varios tipos de suelo, tanto cohesivos como no cohesivos. Considerado como una aproximación de segundo orden, constituye una variante elastoplástica del modelo hiperbólico.

Según Nieto et al. (2009) el modelo Hardening Soil considera como parámetros elásticos básicos el ángulo de fricción, la cohesión y el ángulo de dilatancia. Los valores de estos parámetros son iguales a los del modelo Mohr-Coulomb.

Por otra parte, la dependencia de los parámetros de rigidez respecto a un estado general de esfuerzos se relaciona con la siguiente expresión.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \phi + \sigma'_3}{c \cdot \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (15)$$

Dónde  $E_{50}^{ref}$  es el módulo de elasticidad de referencia que se obtiene al alcanzar el 50% de la tensión de falla, y  $m$  una constante que representa el tipo de dependencia particular a cada tipo de suelo. Normalmente, para arcillas la dependencia a los esfuerzos es lineal, lo que equivale a  $m = 1$ .

Luego, a partir de la Ecuación (15) se determina el valor de  $E_{50}^{ref}$ .

Siguiendo con la metodología de transformación, se tiene que el módulo de elasticidad recarga-descarga de referencia se obtiene de la Ecuación (16), por lo que basta con determinar el valor de  $E_{ur}$ , que para suelos arcillosos corresponde a tres veces  $E_{50}$ .

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \phi + \sigma'_3}{c \cdot \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (16)$$

Por otra parte, para determinar el valor del módulo de elasticidad edométrico de referencia se utiliza la siguiente correlación.

$$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} \left( \frac{(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \right) \quad (17)$$

Luego, sólo falta determinar el valor de la relación de falla, que por defecto se asume 0,9, y la presión de referencia, que se calcula como la tensión vertical que posee el suelo a una profundidad  $z$  desde la superficie.

## b) Metodología de transformación desde Hardening Soil a Cysoil

Para determinar los parámetros geotécnicos del modelo Cysoil se utiliza la tabla de la Figura 2-12. Esta tabla posee las fórmulas de transformación recomendadas por el Manual de Plaxis para determinar los parámetros de Cysoil a partir de Hardening Soil. Cabe destacar que, el único parámetro que debe ajustarse es la cohesión, ya que este no es nulo, sino que asume el mismo valor que el considerado en los modelos Mohr-Coulomb y Hardening Soil.

Plaxis Hardening-Soil	Hardening Cysoil
$E_{50}^{ref}$	–
$E_{ur}^{ref}$	$G_{ref}^e = \frac{E_{ur}^{ref}}{2(1+\nu_{ur})}$
$E_{oed}^{ref}$	$K_{ref}^{iso} = E_{oed}^{ref} \cdot \frac{(1+\nu_{ur})}{3(1-\nu_{ur})}$
–	$R = \frac{E_{ur}^{ref}}{3(1-2\nu_{ur})K_{ref}^{iso}} - 1$
Cohesion, $C$	zero
Friction angle, $\phi$	$\phi_f$
Dilation angle, $\psi$	$\psi_f$
Poisson's ratio, $\nu_{ur}$	$\nu_{ur}$
Power, $m$	idem
$K_0^{nc}$ (using cap)	$K_0$
Tensile strength	zero
Failure ratio, $R_f$	idem

Figura 2-12: Relación entre los parámetros de Hardening Soil y Cysoil, (ICG, 2013)

La tabla anterior permite determinar los parámetros geotécnicos para Cysoil, sin embargo, aún faltan por definir dos parámetros, la presión de referencia,  $p_{ref}$ , y el factor de calibración  $\beta$ . Para determinar el valor de la presión de referencia basta con asumir el mismo valor que el determinado para Hardening Soil, mientras que para  $\beta$  se deben calibrar las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos triaxiales reproducidos en el software FLAC3D, con las obtenidas en laboratorio.

### 3. Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes de la construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago, específicamente del tramo que se encuentra embebido en los suelos finos del noroeste. En este capítulo se hace referencia a las características geotécnicas del lugar, a la geometría de los túneles, y a la secuencia constructiva llevada a cabo; información que servirá como parámetro de entrada del modelo numérico.

#### 3.1. Línea 3 de Metro, Tramo en Estudio

En la Figura 3-1 se observa el trazado de la Línea 3 de Metro, la cual posee aproximadamente 22 Km de largo y 18 estaciones. Esta nueva Línea permitirá conectar el norte de la ciudad de Santiago con el centro y el sector oriente, ya que su trazado se inicia en el cruce de las avenidas Américo Vespucio Norte e Independencia, en la futura estación Los Libertadores, y finaliza en la intersección de las avenidas Larraín y Tobalaba, en la futura estación Fernando Castillo Velasco (Pozo et al. 2015). Actualmente la Línea 3 se encuentra en etapa de expansión, ya que se está construyendo un nuevo tramo en el sector norte de la ciudad, el cual se inicia en la estación terminal Los Libertadores y se extiende por 3 estaciones más hacia el poniente, hasta llegar al centro de la comuna de Quilicura.

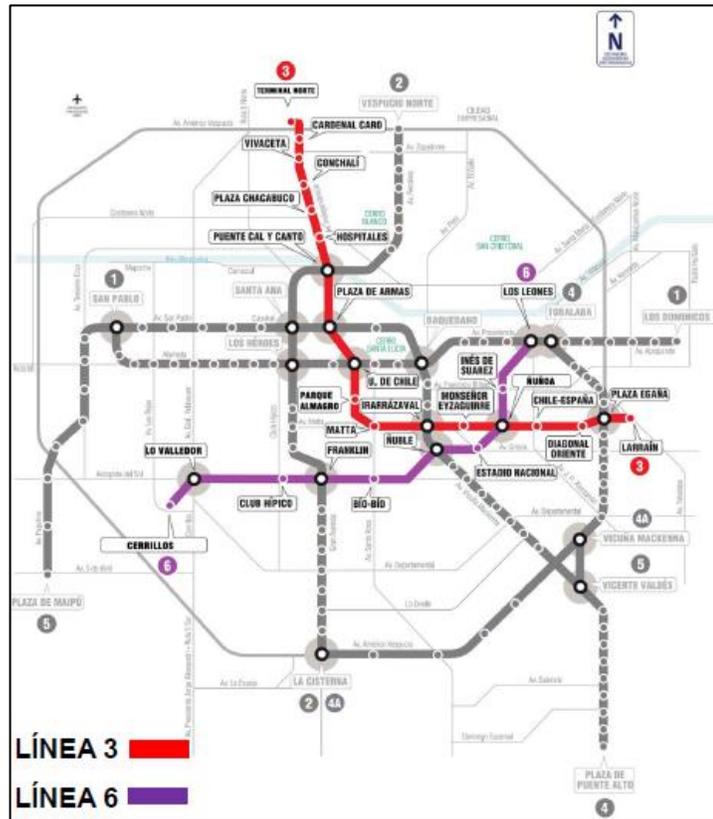


Figura 3-1: Plano red del Metro de Santiago, (Pozo, J., 2015)

Cabe destacar que, como en esta memoria se estudiaron los suelos finos del noroeste, sólo se considerará el tramo 1 de la Línea 3, el cual considera los túneles interestación ubicados entre la Cola de Maniobras de la Estación Terminal Norte L3 y la estación Cardenal Caro, entre los puntos kilométricos PK 0,775 y PK 2,600 (Figura 3-2).

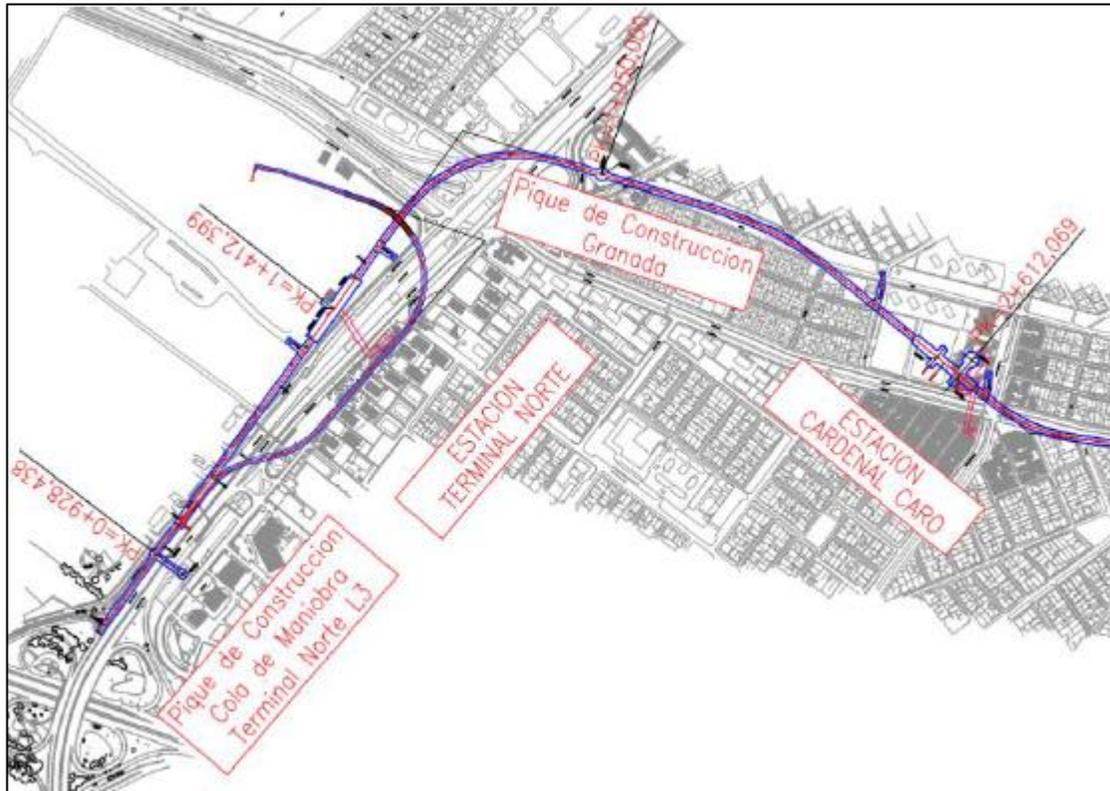


Figura 3-2:Detalle Línea 3 del Metro de Santiago, tramo 1 (ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A)

### 3.2. Estratigrafía

Según la estratigrafía del subsuelo de Santiago (Figura 3-3), los túneles interestación de la Línea 3 ubicados en el tramo 1 se encuentran embebidos en los suelos finos del noroeste, compuestos principalmente por limos areno-arcillosos, con bajo y mediano índice de plasticidad, y probable presencia de lentes de arena y grava.

En esta sección se presentan las principales características del suelo presente en el tramo 1 de la Línea 3, además de los parámetros geotécnicos adquiridos para los modelos constitutivos Mohr-Coulomb y Cysoil.

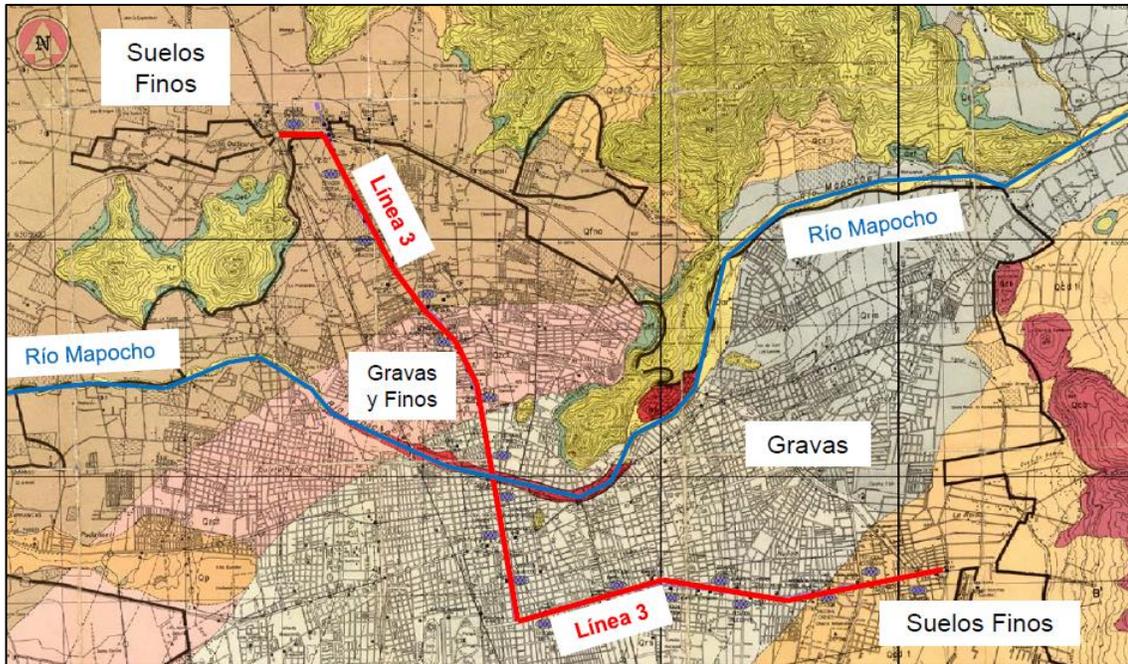


Figura 3-3: Carta geológica de Santiago, (Valenzuela, G., 1978)

### 3.2.1. Propiedades Geotécnicas

Petrus elaboró un informe de mecánica de suelos para la Línea 3 del Metro de Santiago, basado en exploraciones con calicatas, ensayos en terreno y de laboratorio. De este informe se tienen las unidades geotécnicas para cada tramo de la Línea 3 (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, B).

A continuación, se presentan las propiedades geotécnicas, correspondientes a la unidad geotécnica Suelos Finos.

#### Unidad U-1. Suelos Finos

Constituidos principalmente por limos y arcillas. Consistencia en general media a alta. Clasifica generalmente como CL, ML y CL-ML, según clasificación USCS. Presencia aislada de lentes de poco espesor de arenas finas limosas, gravas y cenizas volcánicas.

Las propiedades geotécnicas de la unidad U-1 se presentan a continuación (Tabla 3-1), dónde  $Z$  es la profundidad medida desde la superficie.

Tabla 3-1: Propiedades geotécnicas, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, B)

Parámetro	Simbología	Unidades	Profundidad	Valor
Peso Unitario	$\gamma$	$\left[\frac{kN}{m^3}\right]$	todo $Z$	18,5
Módulo de Elasticidad	$E$	$[kPa]$	todo $Z$	$20000 + 2750 \cdot Z$
Coefficiente de Poisson	$\nu$	$[-]$	todo $Z$	0,3
Cohesión	$c$	$[kPa]$	$Z \leq 12 [m]$ $Z > 12 [m]$ ,	30 50
Ángulo de Fricción	$\phi$	$[^\circ]$	todo $Z$	31

Por otra parte, para el estado tensional geoestático se asumieron los coeficientes de empuje en reposo que se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Coeficientes de empuje en reposo recomendados para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, B)

Suelos Finos	$K_0$
$Z \leq 12 [m]$	0,65
$Z > 12 [m]$	0,45

### 3.2.2. Parámetros Geotécnicos

Las propiedades geotécnicas de los suelos indican que se considera un módulo de elasticidad lineal, el cual aumenta con la profundidad, mientras que para la cohesión y el coeficiente de empuje en reposo in situ  $K_0$ , se han definido dos valores, para suelos que se encuentran sobre los 12 [m] de profundidad y para suelos que se encuentran por debajo. Es por esta razón que, para facilitar el análisis, se definen dos estratos de suelo fino, cuyos parámetros geotécnicos se presentan a continuación.

#### a) Modelo Mohr-Coulomb

A partir de las propiedades geotécnicas presentadas en la Tabla 3-1 se determinan los parámetros geotécnicos para el modelo Mohr-Coulomb. Cabe destacar que, para determinar el valor del módulo de elasticidad se consideró  $Z$  como la profundidad media de cada estrato.

**Tabla 3-3: Parámetros geotécnicos, modelo Mohr-Coulomb**

Parámetro	Simbología	Unidades	Valor	
			0 [m] < z ≤ 12[m]	z > 12[m]
Módulo de Elasticidad	$E$	[kPa]	36500	72250
Coefficiente de Poisson	$\nu$	[-]	0,3	0,3
Módulo Volumétrico	$K$	[kPa]	30417	60208
Módulo de Corte	$G$	[kPa]	14038	27788
Cohesión	$c$	[kPa]	30	50
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	31	31

### b) Modelo Cysoil

Para determinar los parámetros geotécnicos se sigue la metodología de transformación a partir del modelo Mohr-Coulomb, detallada en la Sección 2.4.3. A continuación, se presentan los parámetros geotécnicos obtenidos para el modelo Cysoil.

**Tabla 3-4: Parámetros geotécnicos, modelo Cysoil**

Parámetro	Simbología	Unidades	Valor	
			0 [m] < z ≤ 12[m]	z > 12[m]
Módulo de Elasticidad	$E$	[kPa]	36500	72250
Módulo volumétrico Elástico de Referencia	$K_{ref}^e$	[kPa]	30417	60208
Módulo de Corte Elástico de Referencia	$G_{ref}^e$	[kPa]	42115	83365
Cohesión	$c$	[kPa]	30	50
Ángulo de Fricción	$\phi$	[°]	31	31
Multiplicador	$R$	[-]	2	2
Potencia	$m$	[-]	0,7	1
Coefficiente de Poisson	$\nu$	[-]	0,3	0,3
Presión de Referencia	$p_{ref}$	[kPa]	83,4	218,2
Relación de Falla	$R_f$	[-]	0,9	0,9
Factor de Calibración	$\beta$	[-]	0,4	0,4

Cabe destacar que, el parámetro  $\beta$  se obtiene de la calibración las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de ensayos triaxiales reproducidos en el software FLAC3D, y las obtenidas en laboratorio. Los gráficos de estas curvas se presentan en el Anexo A.

### 3.3. Geometría

La geometría de los túneles interestación del tramo 1, que considera los túneles entre la Cola de Maniobras de la Estación Terminal Norte L3 y la estación Cardenal Caro, se presenta en el Anexo B (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, C). En este caso, el tramo considera dos geometrías, por una parte, los túneles que se encuentran en el trazado recto siguen la geometría de la sección T1C1-A, mientras que los túneles que se encuentran en el trazado en curva siguen la geometría de la sección T4C1-A.

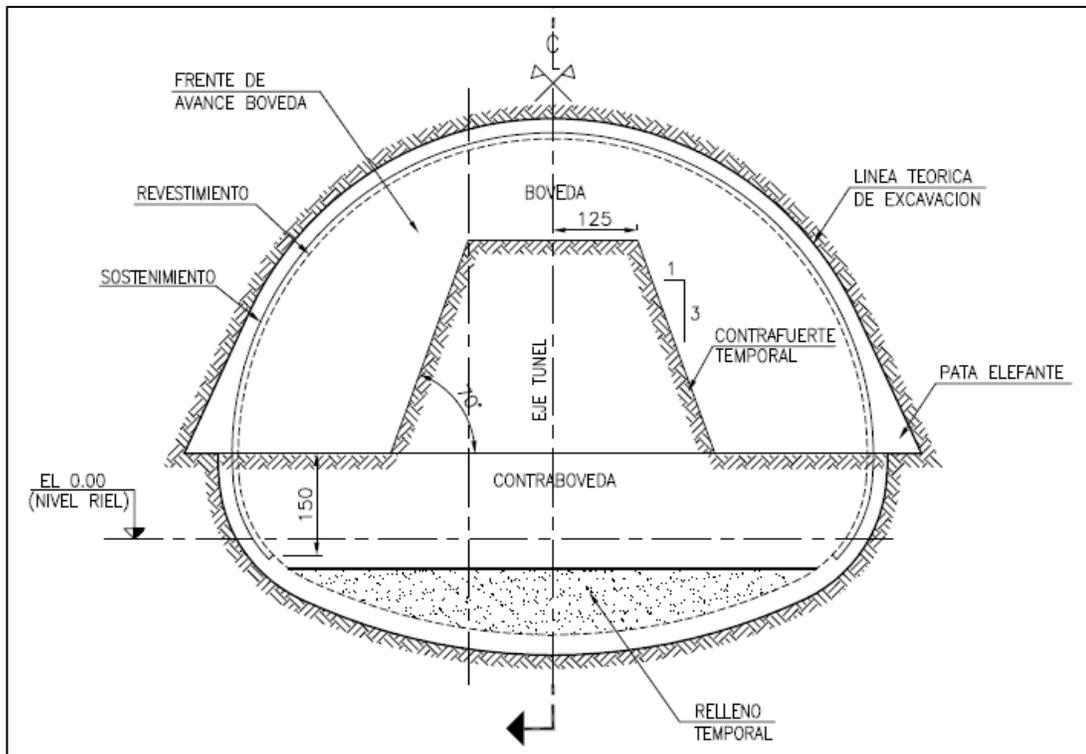
A continuación, se presentan las características principales de ambas secciones.

Tabla 3-5: Características de las secciones T1C1-A y T4C1-A

Sección	T1C1-A	T4C1-A
Altura	8,13 [m]	8,63 [m]
Ancho máximo	10,10 [m]	10,60 [m]
Área del frente de excavación	65,46 [m <sup>2</sup> ]	72,91 [m <sup>2</sup> ]
Distancia entre la cota de riel y la clave del túnel	6,31 [m]	6,58 [m]
Distancia entre la cota de riel y la superficie	22 [m]	22 [m]
Distancia entre el eje del trazado y el eje central del túnel	0 [m]	0,26 [m]

### 3.4. Secuencia Constructiva

La construcción de los túneles interestación que se encuentran en el tramo 1 se llevó a cabo siguiendo el método NATM, dividiendo el frente de excavación en dos secciones, bóveda y contrabóveda, esto, con tal de aumentar la estabilidad de la excavación y disminuir sus deformaciones. Además, se colocaron mallas electrosoldadas, marcos reticulados y hormigón proyectado, dando forma al sostenimiento y revestimiento del túnel, alcanzando un espesor de 40 [cm]. A continuación, se presenta la geometría de la sección de avance considerada en la excavación.



**Figura 3-4: Sección túnel interestación con contrabóveda, para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, E)**

La secuencia de construcción de los túneles está compuesta por cuatro fases, las cuales consideran la excavación, el sostenimiento y el revestimiento del túnel. A continuación, se detallan las cuatro fases constructivas.

Fase I (bóveda):

1. Se excava en bóveda un tramo de aproximadamente 1 [m], dejando un contrafuerte temporal de terreno sin excavar.
2. En caso de ser necesario, se coloca un sistema de drenaje. Se captan y evacúan filtraciones.
3. Se coloca sello de hormigón proyectado, para regularizar la superficie excavada, cubriendo eventuales sobreexcavaciones.
4. Luego, se coloca la primera malla electrosoldada, empalmándola con la malla del tramo excavado anteriormente. Se coloca refuerzo exterior de ser necesario.
5. Se coloca un marco reticulado a 1 [m].
6. Finalmente, se vuelve a colocar hormigón proyectado, sin cubrir la barra interior del marco.

7. Se repiten los pasos desde el 1 hasta el 6.
8. Se coloca la segunda malla electrosoldada, en el tramo de 2 [m], empalmándola con la malla del tramo anterior.
9. Se coloca hormigón proyectado hasta completar el espesor del sostenimiento. Se debe dejar un receso para futuro empalme de la malla de la contrabóveda.
10. Se repiten los pasos desde el 1 hasta el 9 hasta completar 8 [m].

Fase II (contrabóveda):

11. Se excava un tramo de 2 [m] en contrabóveda.
12. En caso de ser necesario, se coloca un sistema de drenaje empalmándolo con el de la bóveda.
13. Se coloca un sello de hormigón proyectado, para regularizar la superficie excavada, cubriendo eventuales sobreexcavaciones.
14. Luego, se coloca la primera malla electrosoldada, en los 2 [m], empalmándola con la malla de la bóveda.
15. Se colocan dos marcos reticulados, empalmándolos con los de la bóveda.
16. Se vuelve a colocar hormigón proyectado, sin cubrir la barra interior del marco.
17. Se coloca la segunda malla electrosoldada, en los 2 [m], empalmándola con la malla del tramo anterior y la de la bóveda.
18. Se coloca hormigón proyectado hasta completar el espesor del sostenimiento.
19. Se coloca la tercera malla electrosoldada.
20. Se vuelve a colocar hormigón proyectado hasta completar el espesor del revestimiento.
21. Se coloca relleno temporal en la superficie inferior del túnel.

Fase III (bóveda y contrabóveda):

22. Se repiten los pasos anteriores hasta alcanzar la longitud total del túnel.

Fase IV (bóveda):

23. Se debe hormigonar revestimiento en bóveda y paredes. Esta fase se debe realizar lo más cerca del frente de excavación sin interferir en el ciclo normal de avance, por lo que se decidió aplicar el revestimiento a 10 [m] de la frente.

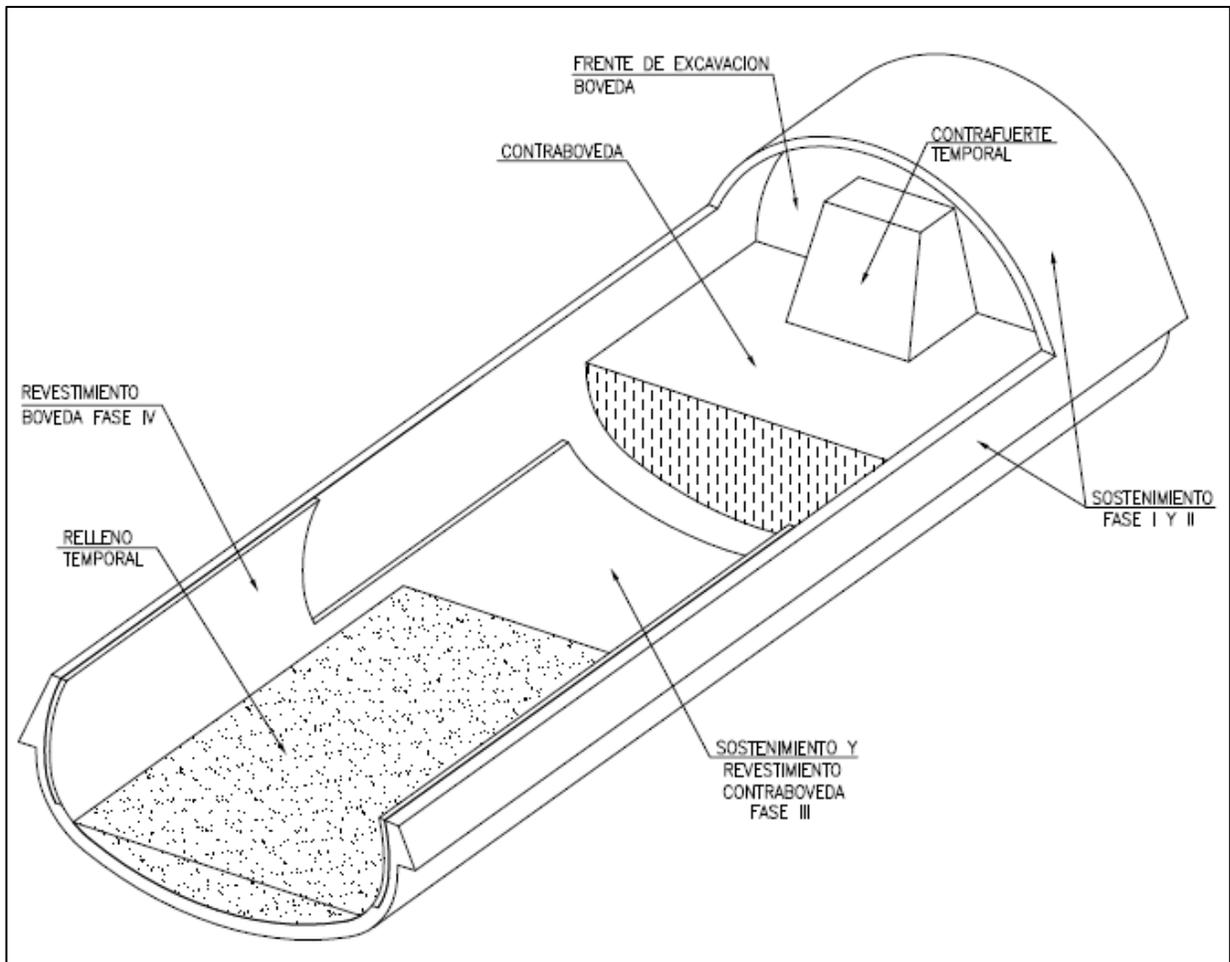
Finalmente, se presentan tres figuras, dos fotografías que muestran diferentes etapas de la construcción de los túneles y un esquema con la secuencia constructiva.



Figura 3-5: Secuencia constructiva, fase II, paso 14, (Pozo, J., 2015)



Figura 3-6: Secuencia constructiva, fase II, paso 19, (Pozo, J., 2015)



**Figura 3-7: Secuencia constructiva, túnel interestación con contrabóveda, para suelos finos, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, E)**

### 3.5. Elementos Estructurales

Para el sostenimiento y revestimiento de los túneles interestación del tramo en estudio se utilizó hormigón proyectado, mallas electrosoldadas y marcos reticulados. Para esto se utilizaron los siguientes materiales:

- Hormigón proyectado: G25
- Mallas electrosoldadas: AT56-50H
- Acero de refuerzo: A640-420H

Por nomenclatura, y utilizando las normas NCh170 (2016) y ACI-318-08 se determinan los parámetros de diseño del hormigón estructural.

Tabla 3-6: Parámetros de diseño hormigón estructural, (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2016)

Hormigón proyectado (G25)	
Parámetro	Propiedad mecánica
Resistencia a la compresión cilíndrica (28 días)	250 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Resistencia a la tracción	25 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Módulo de Elasticidad	235000 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Coefficiente de Poisson	0,15 [-]
Peso específico	2,45 [tonf/m <sup>3</sup> ]
Barras y mallas de acero de refuerzo	
Resistencia a tracción de mallas electrosoldadas	5000 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Resistencia a tracción de barras	4200 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Módulo de Elasticidad	2100000 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Coefficiente de Poisson	0,25 [-]

### 3.6. Instrumentación y Monitoreo

Como se mencionó anteriormente en la Sección 2.1. uno de los principios fundamentales del NATM es considerar el terreno como parte del sistema de soporte, es por esta razón que se debe implementar un programa de monitoreo que permita seguir y controlar las deformaciones producidas en el terreno durante la construcción de los túneles.

Para controlar la estabilidad de las excavaciones producto de la construcción de los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago, específicamente del tramo 1, se implementó la instrumentación y el programa de monitoreo que se presentan a continuación.

#### 3.6.1. Instrumentación

Las variables medidas, además de la instrumentación empleada, son las siguientes (Metro, 2012).

##### a) Convergencias

Las medidas de convergencia de los túneles fueron registradas a través de un sistema de monitoreo tridimensional óptico de deformaciones, sobre la base de un sistema espacial de coordenadas. Este sistema está compuesto por puntos de referencia fijos en la cavidad del túnel, materializados mediante prismas ópticos, y por teodolitos ópticos electrónicos de alta precisión de estación libre, integrado con un distanciómetro electrónico coaxial. Este tiene una exactitud promedio de 0,3 [mgon] para medición de ángulos, y +/- 0,5 [mm] para distancias.

## **b) Asentamientos**

Para determinar los asentamientos del terreno producto de la excavación de los túneles se utilizaron niveles ópticos de alta precisión, miras topográficas y puntos de referencia superficiales y subsuperficiales. A continuación, se presentan los detalles de estos dos últimos elementos.

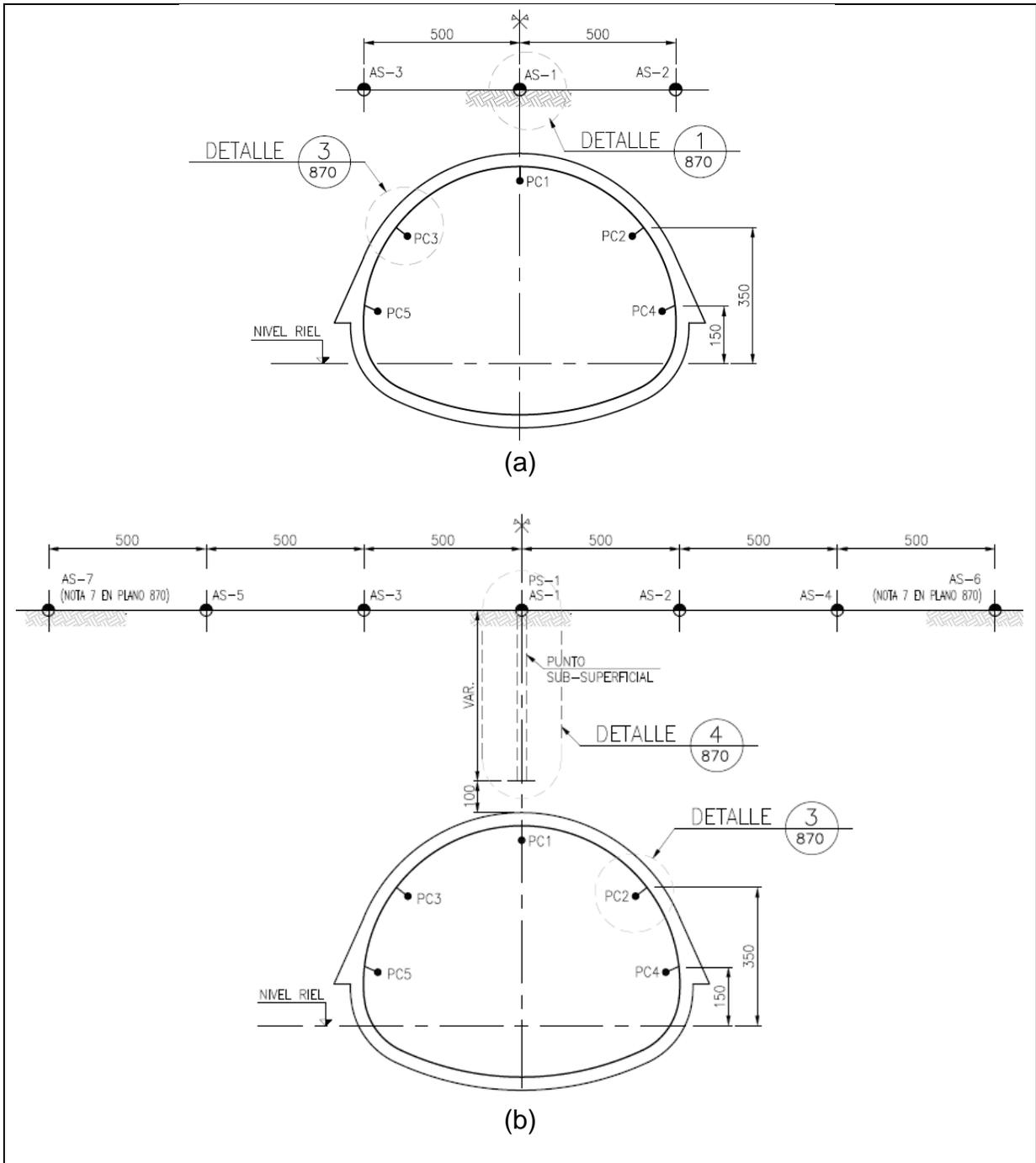
- Puntos de referencia superficiales: Se materializan mediante pernos, sobre pavimento o monolitos de hormigón (terreno natural).
- Puntos de referencia subsuperficiales: Se materializan a través de perfiles de acero anclados en profundidad. Este anclaje se realiza en la base de un pozo utilizando mortero de cemento u hormigón pobre. Sobre el extremo superior del perfil de acero se suelda un perno o punto de medición. Finalmente, el instrumento debe ser protegido mediante una caja rígida instalada a nivel de superficie.

## **c) Asentamientos en estructuras y edificios**

Para monitorear los asentamientos de estructuras y edificios cercanos a los túneles se utilizaron los mismos instrumentos que permiten determinar los asentamientos. La única diferencia recae en los puntos de referencia, ya que estos fueron empotrados en muros o superficies externas, o en muros portantes internos del edificio, mediante pernos de referencia.

### **3.6.2. Programa de Monitoreo**

El programa de monitoreo incluye dos tipos de configuraciones, con niveles de control medio y alto (T2 y T3), las cuales incluyen puntos de control para la medición de convergencias (PC), asentamientos superficiales (AS) y asentamientos subsuperficiales (PS). A continuación, se presentan las secciones de monitoreo, seguidas de la Tabla 3-7, dónde se detallan los tipos de mediciones tomadas y la distribución de los puntos de control de cada configuración.



**Figura 3-8: Secciones de control para los tramos A y B de la Línea 3: (a) Sección con nivel de control medio (b) Sección con nivel de control alto (CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A)**

**Tabla 3-7: Secciones de control tramo 1, Línea 3 de Metro,  
(CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS, 2013, A)**

Sección de Monitoreo	Nivel de Control	Tipo de Medición	Distribución de Puntos de Control
T2 (Figura 3.1 (a))	Medio	Convergencia interior	5 puntos de control perimetrales (PC)
		Asentamiento de superficie	3 puntos de control superficiales. Un punto en el eje del túnel y los otros a 5 [m] a cada lado del eje (AS)
T3 (Figura 3.1 (b))	Alto	Convergencia interior	5 puntos de control perimetrales (PC)
		Asentamiento de superficie	7 puntos de control superficiales. Un punto en el eje del túnel y los otros a 5 [m] a cada lado del eje (AS)
		Asentamiento subsuperficial	1 punto de control a 1 [m] sobre la clave del túnel (PS)

Además, se realizó un monitoreo especial a edificios habitacionales de 4 pisos cercanos a la estación Cardenal Caro (Granada esq. Argel), ya que estos podrían verse afectados por la construcción de los túneles.

## 4. Resultados Obtenidos a partir de Monitoreo

Para determinar las deformaciones producto de la construcción de los túneles interestación se decidió trabajar sólo con aquellos sectores dónde se observa principalmente limo arcilloso, ya que de esta forma la unidad geotécnica no estaría sub estimando propiedades de suelos más resistentes. A partir de los perfiles estratigráficos y descartando singularidades en los túneles se ha decidido estudiar 10 secciones de monitoreo superficial y 5 puntos de asentamiento sub superficial.

A partir de las mediciones obtenidas de monitoreo es posible ajustar las curvas teóricas de asentamiento transversal superficial para cada sección, mientras que los asentamientos medidos en los puntos sub-superficiales se comparan directamente con los resultados que arroja el modelo numérico.

### 4.1. Asentamientos Medidos en Superficie

Como se mencionó anteriormente, se estudiarán 10 secciones de monitoreo superficial, con niveles de control medio y alto. A continuación, en la Tabla 4-1 se presentan las secciones a analizar, cuyos nombres hacen referencia al punto kilométrico dónde se ubican. Además, se presenta la geometría que posee el túnel en dicha ubicación.

Tabla 4-1: Secciones de monitoreo

Sección de Monitoreo	Geometría
Pk 1+171	T1C1-A
Pk 1+232	T1C1-A
Pk 1+253	T1C1-A
Pk 1+278	T1C1-A
Pk 1+988	T1C1-A
Pk 2+017	T1C1-A
Pk 2+067	T1C1-A
Pk 2+167	T4C1-A
Pk 2+262	T4C1-A
Pk 2+313	T4C1-A

Para ver más detalles sobre la ubicación de estas secciones, revisar Anexo C.

#### 4.1.1. Curvas de Asentamientos Representativos

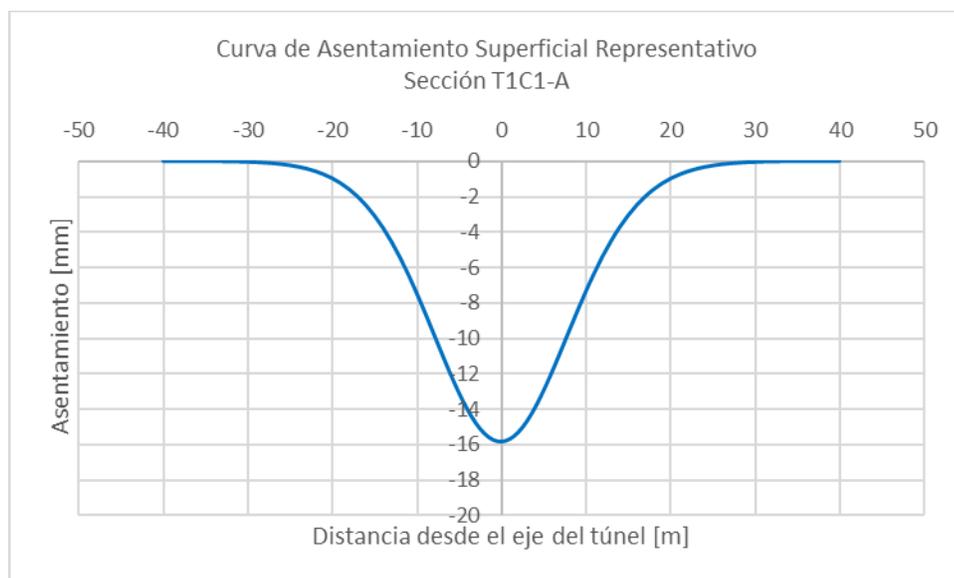
De las secciones de monitoreo se obtienen los asentamientos registrados en cada punto de control, permitiendo ajustar la curva teórica de asentamientos superficiales transversales de cada sección (Anexo D). Teóricamente, estas curvas obedecen una distribución gaussiana, por lo que se ajusta la media y la desviación estándar para cada

sección de monitoreo. Luego, la curva de distribución obtenida es ponderada por el valor del asentamiento máximo de la sección, con tal que la curva estimada concuerde con los datos registrados de monitoreo. A continuación, se presentan los valores ajustados para la media  $\mu$ , la desviación estándar  $\sigma$  y el asentamiento máximo  $\delta_{m\acute{a}x}$  de cada sección de monitoreo. Cabe destacar que, como el asentamiento máximo corresponde al valor obtenido en el punto de monitoreo ubicado en el eje central del túnel, o muy cerca de este, los valores de la media son nulos, o muy cercanos a cero.

**Tabla 4-2: Valores ajustados para las curvas de asentamiento**

Sección de Monitoreo	Geometría	$\mu$ [-]	$\sigma$ [-]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]
Pk 1+171	T1C1-A	0,6	9,2	-16,1
Pk 1+232	T1C1-A	0,0	8,8	-16,0
Pk 1+253	T1C1-A	0,1	7,0	-16,7
Pk 1+278	T1C1-A	-1,0	7,5	-15,7
Pk 1+988	T1C1-A	0,0	9,8	-16,9
Pk 2+017	T1C1-A	0,0	9,0	-14,0
Pk 2+067	T1C1-A	0,0	6,3	-15,4
Pk 2+167	T4C1-A	0,0	7,5	-21,2
Pk 2+262	T4C1-A	-0,6	10,0	-17,2
Pk 2+313	T4C1-A	0,0	7,8	-14,9

Después de ajustar las curvas de asentamiento para cada sección, se obtuvieron las curvas de asentamiento representativo, tanto para los túneles que se encuentran en el trazado en recta, como para los que se encuentran en el trazado en curva (Figura 4-1 y 4-2).



**Figura 4-1: Curva de asentamiento superficial representativo, sección T1C1-A**

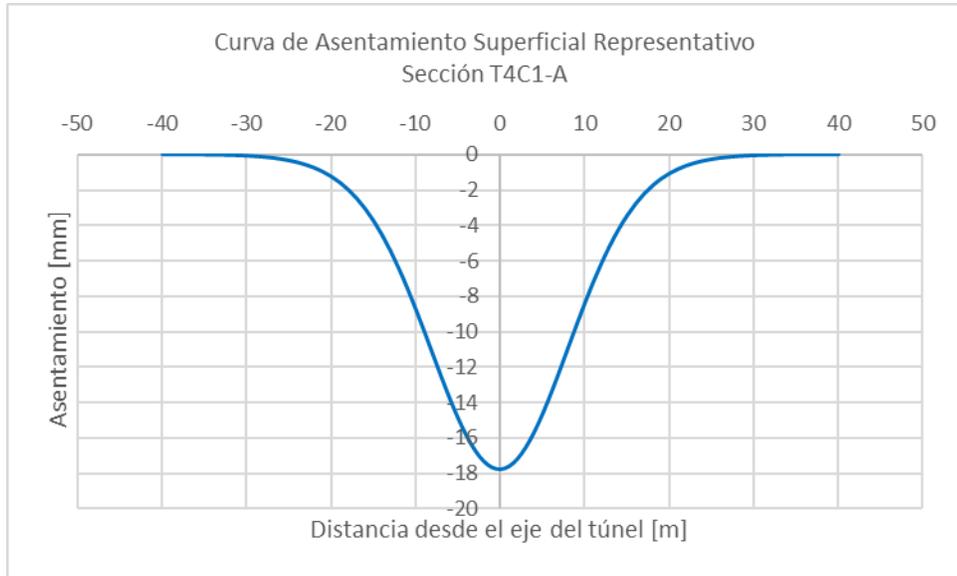


Figura 4-2: Curva de asentamiento superficial representativo, sección T4C1-A

#### 4.1.2. Banda Representativa de Asentamientos

Para facilitar la estimación de los parámetros geotécnicos se decidió definir un rango de curvas capaces de representar los asentamientos esperados en el sector de análisis. Este rango de curvas se determinó a partir del promedio y la desviación estándar de los puntos que definen la curva de asentamiento de cada sección de monitoreo. Luego, en las Figuras 4-3 y 4-4 se presenta la banda de asentamientos esperados para las diferentes geometrías, T1C1-A y T4C1-A.

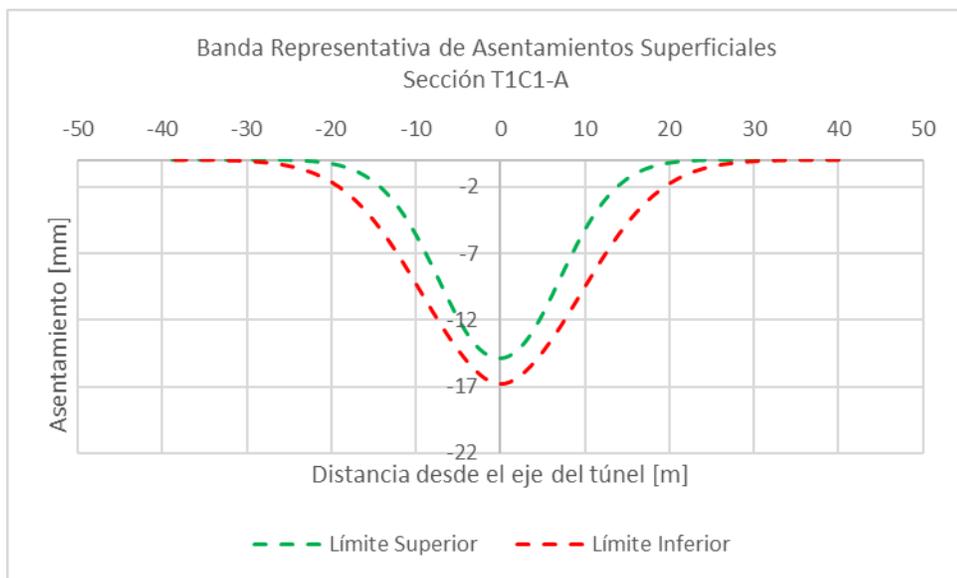


Figura 4-3: Banda representativa de asentamientos superficiales, sección T1C1-A

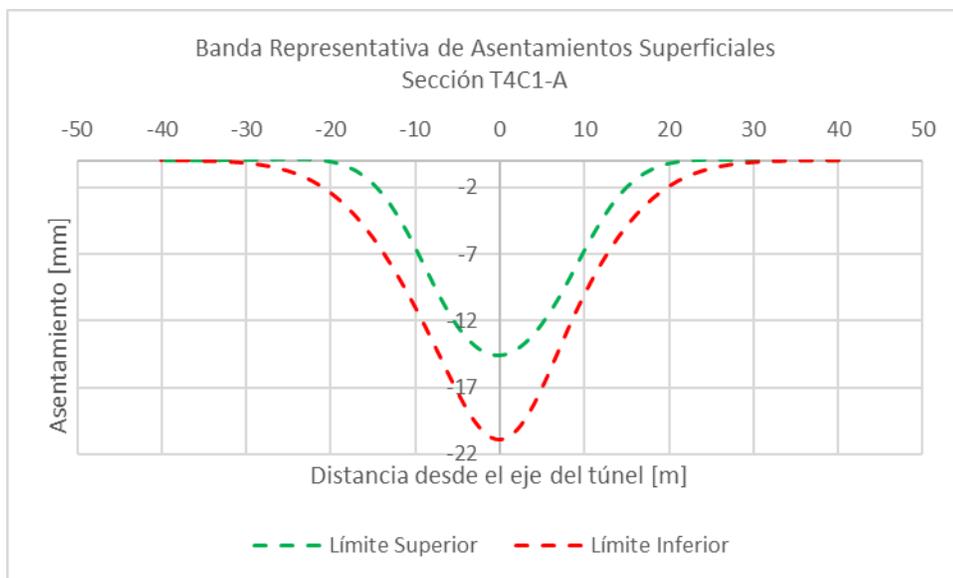


Figura 4-4: Banda representativa de asentamientos superficiales, sección T4C1-A

De los dos últimos gráficos se tiene que los asentamientos máximos esperados sobre el eje central del túnel varían entre -14,8 y -16,7 [mm], para las secciones dónde el túnel posee geometría T1C1-A (65,46 [m<sup>2</sup>]), y entre -14,6 y -21 [mm] para las secciones dónde el túnel posee geometría T4C1-A (72,91 [m<sup>2</sup>]).

#### 4.2. Asentamientos Medidos en Puntos Subsuperficiales

Para determinar los asentamientos en puntos subsuperficiales se estudian las deformaciones registradas en 5 puntos, ubicados un metro sobre la clave del túnel. Si bien todos estos puntos registran asentamientos, no todos lo hicieron correctamente, ya que algunas mediciones se iniciaron cuando el frente de excavación ya había pasado por la sección donde se encontraba el punto subsuperficial. Además, considerando que no todos los puntos de referencia subsuperficiales, en la práctica, se encuentran sobre el eje central del túnel, se tiene que sólo 1 de los 5 puntos registra asentamientos correctamente (Tabla 4-3).

Tabla 4-3: Asentamiento medido en punto subsuperficial

Punto Subsuperficial	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Geometría
Pk 1+988	-19,8	T1C1-A

Cabe destacar que, el punto subsuperficial Pk 1+988 registró asentamientos desde que el frente de excavación se encontraba a más de 40 [m] de la sección de monitoreo, hasta que el frente de excavación llegó a sobrepasar la sección en más de 60 [m], logrando registrar deformaciones que se mantuvieron constantes en el tiempo.

Además, considerando que las deformaciones en profundidad, específicamente en los puntos subsuperficiales, pueden llegar a ser iguales o mayores que las deformaciones en superficie, se tiene que el asentamiento máximo registrado por el punto Pk 1+988 concuerda con lo esperado, ya que sobrepasa en aproximadamente 5 [mm] los asentamientos superficiales registrados en monitoreo para los túneles que se encuentran en el trazado en recta.

## **5. Modelo Numérico**

La mayoría de las veces, el análisis y diseño de estructuras y excavaciones en suelo se debe llevar a cabo con información limitada, teniendo en cuenta que el comportamiento del suelo y sus propiedades resistentes pueden variar considerablemente. Es por esta razón que el uso de modelos numéricos resulta sumamente conveniente, ya que permite modelar problemas y obtener la respuesta del suelo, que al ser comparada con el comportamiento real que este tuvo, permite ajustar las propiedades resistentes del suelo, y de esta forma caracterizar correctamente los estratos.

Para lograr estimar los parámetros geotécnicos del suelo utilizando FLAC3D es necesario estudiar y conocer a cabalidad el software. A continuación, se presentan las características principales del modelo numérico en tres dimensiones realizado en FLAC3D, para las excavaciones de los túneles interestación ubicados en el tramo 1 de la Línea 3 del Metro de Santiago, además de los resultados obtenidos con este.

### **5.1. Modelo Numérico en FLAC3D**

En esta sección se presentan los pasos a seguir en FLAC3D para resolver el problema mediante análisis estático. A continuación, se presentan los aspectos específicos que fueron considerados en la creación y resolución del modelo.

#### **5.1.1. Malla de Diferencias Finitas**

FLAC3D posee herramientas que permiten generar y manipular una malla de diferencias finitas, pudiendo crear diferentes geometrías en tres dimensiones.

La dificultad de generar una malla de diferencias finitas recae en su zonificación, ya que se debe optimizar el modelo, con tal de obtener resultados precisos considerando un número razonable de zonas. Es por esta razón que el Manual de FLAC3D recomienda considerar los siguientes factores:

- Mallas más finas permiten tener resultados más precisos, ya que permiten representar mejor altos gradientes de esfuerzos o deformaciones, pero requieren de mayor tiempo de cálculo.
- La precisión aumenta cuando las dimensiones de las zonas aumentan tendiendo a la unidad.
- Si existen zonas de distintos tamaños, el cambio entre la más pequeña a la más grande debe ser gradual.

Luego, para facilitar la creación de la malla de diferencias finitas se utiliza el programa Phase2, que permite importar la geometría del problema mediante un documento .dxf (AutoCAD), y que cuenta con herramientas que permiten discretizar y generar la zonificación de la malla en forma automática, permitiendo incluso, generar sectores con mayor zonificación. A continuación, se presenta la malla generada en Phase2, dónde es posible observar una mayor densificación alrededor del túnel.

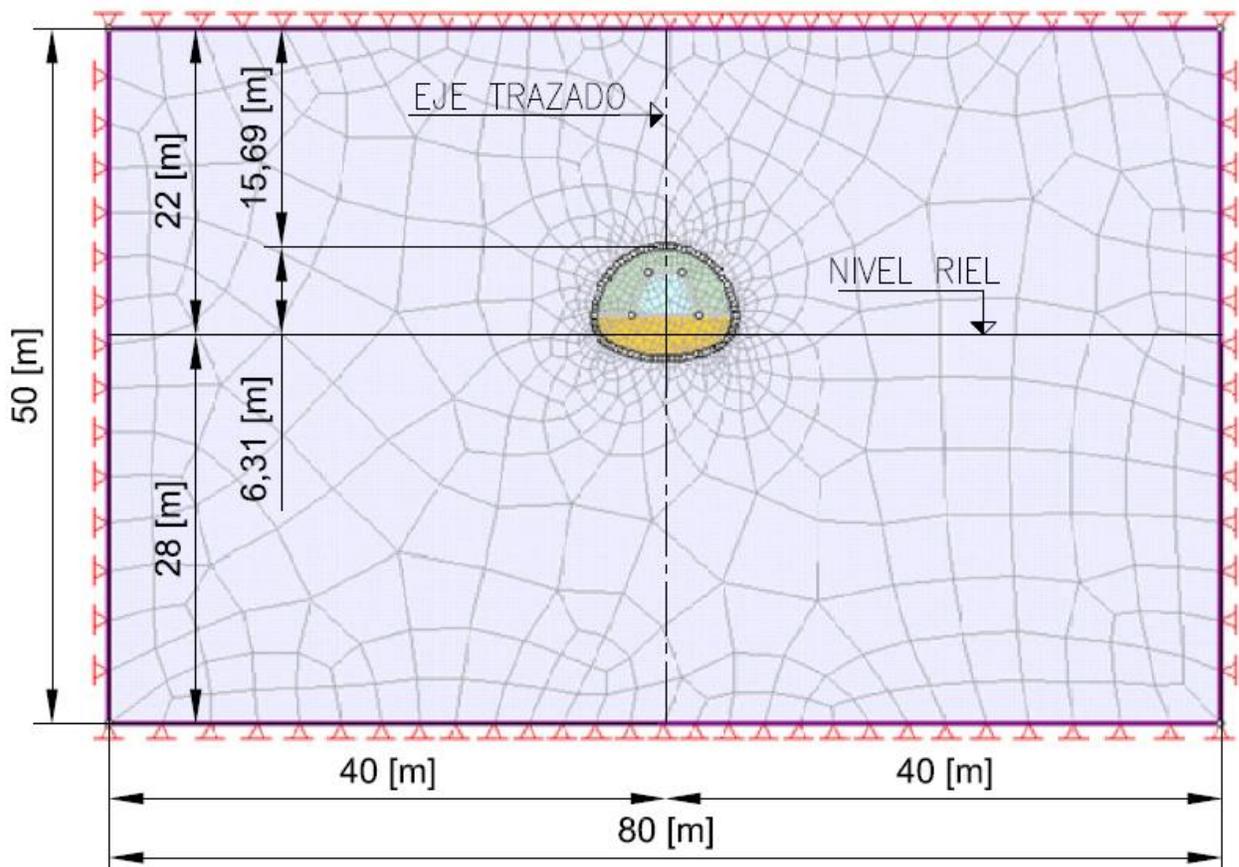


Figura 5-1: Malla de diferencias finitas, Phase2

La malla presentada anteriormente cuenta con 50 [m] de alto y 80 [m] de ancho, dimensiones suficientes para que las condiciones de borde no influyan en la respuesta del modelo. En la Tabla 5-1, se presentan en detalle las dimensiones de la malla, cuyo origen se ubica en la intersección del eje central del túnel y la cota de riel.

Tabla 5-1: Dimensiones de la malla

Sección	T1C1-A	T4C1-A
Área del frente de excavación	65,46 [m <sup>2</sup> ]	72,91 [m <sup>2</sup> ]
Distancia entre el eje del trazado del túnel y los costados	40 [m]	40 [m]
Distancia entre la cota de riel y la clave del túnel	6,31 [m]	6,58 [m]
Distancia entre la cota de riel y la superficie	22 [m]	22 [m]
Distancia entre la cota de riel y el límite inferior	28 [m]	28 [m]

Luego, para extraer la malla se utiliza el programa F2F, que permite, a partir de la malla generada en Phase2, crear una malla en tres dimensiones en el formato de FLAC3D. En este caso, la malla cuenta con 150 [m] de espesor, distancia lo suficientemente grande como para despreciar las condiciones de borde.

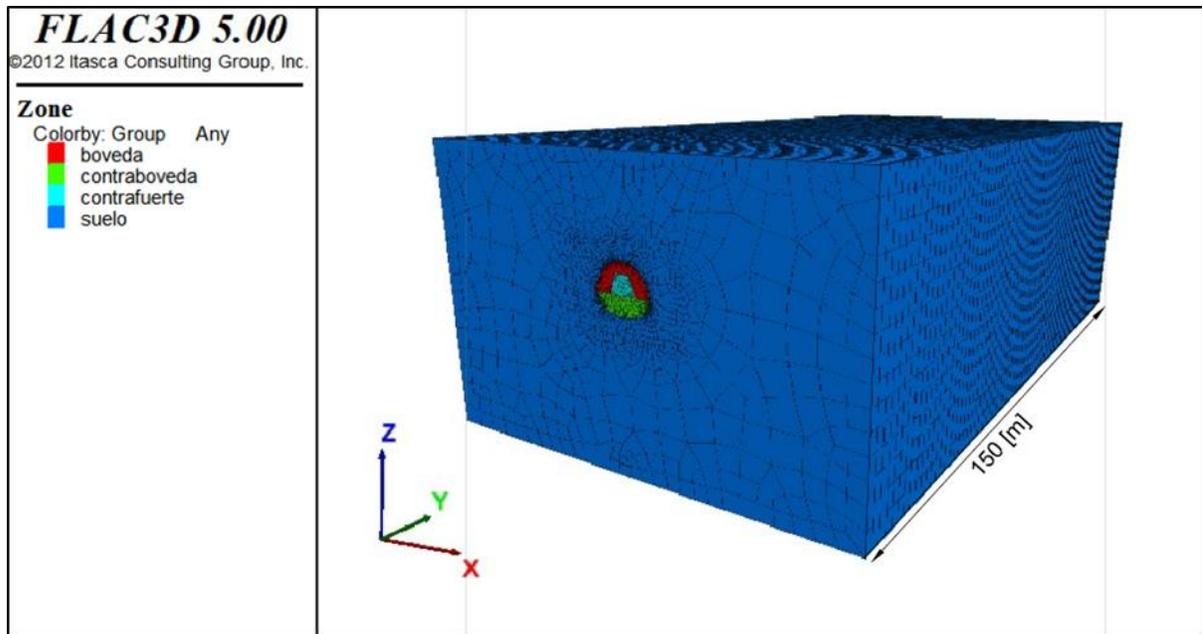


Figura 5-2: Malla de diferencias finitas, FLAC3D

Cómo se observa en la Figura 5-2, la malla se dividió en cuatro zonas, bóveda, contrabóveda, contrafuerte y suelo, ya que permitirán, en un futuro, modelar la secuencia de excavación del túnel.

### 5.1.2. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde en el modelo numérico se presentan como variables predefinidas en los bordes de la malla. En FLAC3D, se pueden aplicar dos tipos de condiciones mecánicas en los bordes o contornos: esfuerzos y desplazamientos.

Las condiciones de borde pueden ser aplicadas en diferentes caras de la malla, en forma individual, directamente en un *'gridpoint'* (punto específico de la malla o grilla), o pueden variar linealmente en un rango específico mediante el comando *'gradient'*, permitiendo por ejemplo reproducir los efectos del aumento de esfuerzos con la profundidad.

A continuación, se presentan las condiciones de borde aplicadas en el modelo, representadas gráficamente en la Figura 5-3:

- El borde superior se encuentra libre de realizar desplazamientos.
- El borde inferior se encuentra restringido de realizar desplazamientos en el eje z.
- En el eje x, los bordes laterales de la malla se encuentran restringidos de realizar desplazamientos en x.
- En el eje y, los bordes laterales de la malla se encuentran restringidos de realizar desplazamientos en y.

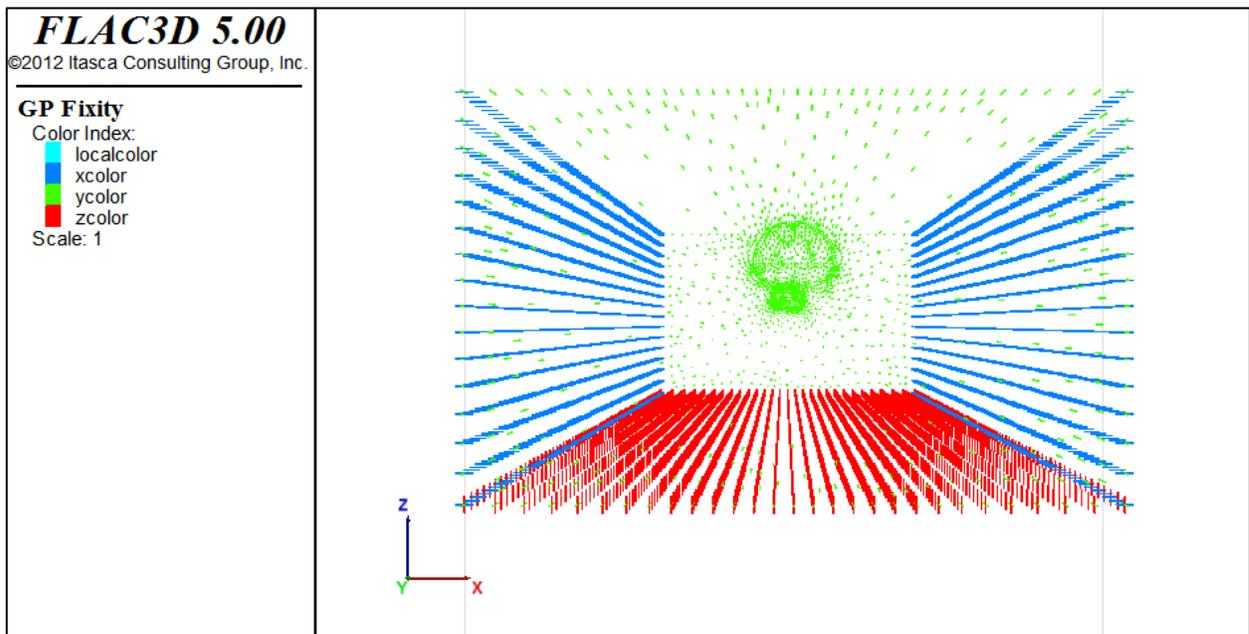


Figura 5-3: Condiciones de borde, FLAC3D

### 5.1.3. Condiciones Iniciales

Antes de realizar una excavación o construcción en el modelo, se deben definir las condiciones iniciales del suelo. Esta información proviene de mediciones realizadas en terreno, sin embargo, en caso de no contar con estos datos el modelo se puede correr para un rango de posibles condiciones iniciales. Por otra parte, si se tiene suficiente información sobre el material, se puede simular el proceso numéricamente.

A continuación, se presentan en detalle las condiciones iniciales del modelo.

#### a) Gravedad

Cerca de la superficie, la variación del esfuerzo con la profundidad no se puede ignorar. El comando '*set gravity*' se utiliza para especificar que la aceleración de gravedad está actuando en el modelo.

#### b) Peso Unitario

El peso unitario del material es necesario para determinar el esfuerzo vertical en el suelo. A partir de las propiedades geotécnicas presentadas en la Sección 3.2.1., se tiene que el peso unitario del suelo es de 18,5 [KN/m<sup>3</sup>].

#### c) Estado de Tensiones

El estado de tensiones en cualquier punto del modelo se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$S = S^{(0)} + g_x x + g_y y + g_z z \quad (18)$$

dónde  $S^{(0)}$  es el valor del esfuerzo en el origen, el cual se ubica en la intersección del eje central del túnel y la cota de riel, justo en la cara frontal de la malla, y  $g_x$ ,  $g_y$  y  $g_z$  las constantes que definen la variación del esfuerzo en x, y, y z, respectivamente.

Para definir el estado de tensiones en el modelo, primero se calcula el esfuerzo vertical, ya que este depende sólo de la cantidad de material que se encuentra sobre el punto de medición. El esfuerzo vertical se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$g_z z = g \rho z \quad (19)$$

dónde  $g$  es la aceleración de gravedad,  $\rho$  la densidad del material, y  $z$  la profundidad medida desde la superficie.

Por otra parte, para calcular los esfuerzos horizontales, tanto en x como en y, basta con multiplicar el esfuerzo vertical por el coeficiente de empuje en reposo. Luego, los esfuerzos horizontales se calculan utilizando la Ecuación (20).

$$g_x x = g_y y = K_0 g_z z \quad (20)$$

Ya definidos los esfuerzos en x, y, y z, y considerando  $S^{(0)} = 0$ , es posible calcular el estado de tensiones en cualquier punto del modelo.

Para incorporar el estado de tensiones en el modelo, se utiliza el comando 'table', el cual permite agregar como parámetros de entrada, los esfuerzos verticales de puntos conocidos. Ya incorporados estos datos se crea una función 'fish', la cual tiene como objetivo discretizar los valores de los esfuerzos verticales en el eje z, además de calcular, a partir de este último, los esfuerzos horizontales.

En la Figura 5-4 se muestra el estado de tensiones en el eje vertical, mientras que en la Figura 5-5 se observa el estado de tensiones para los ejes horizontales, específicamente en el eje x. Cabe destacar que, las tensiones se presentan en [KPa].

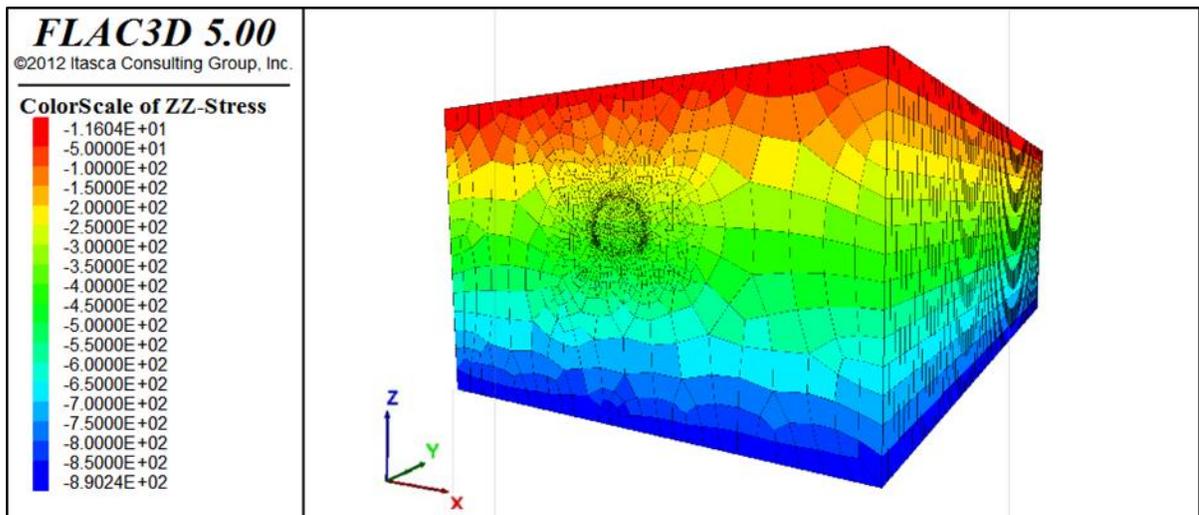


Figura 5-4: Estado de tensiones iniciales en el eje Z, FLAC3D

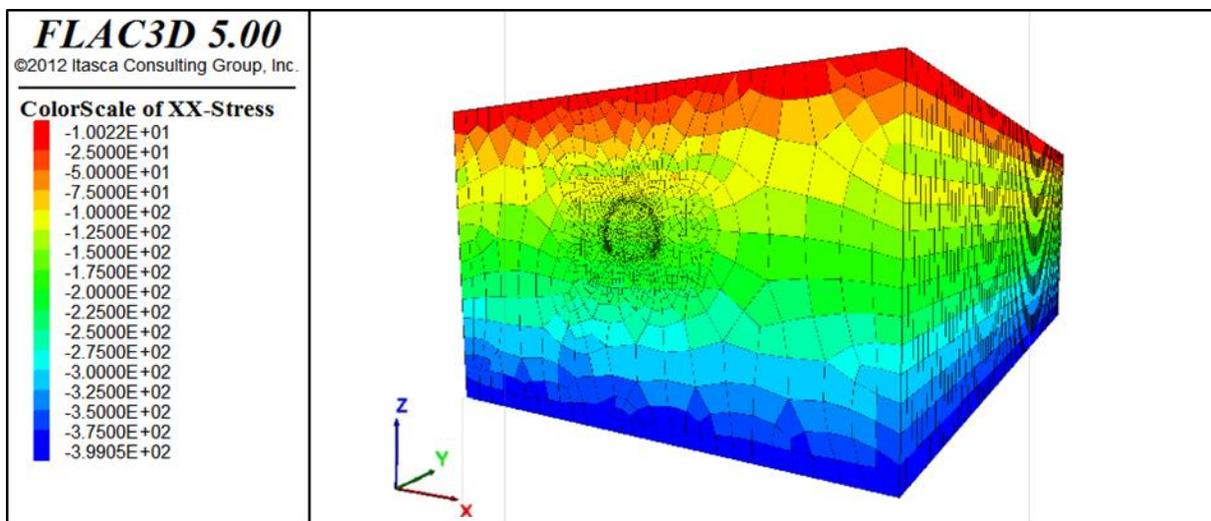


Figura 5-5: Estado de tensiones iniciales en el eje X, FLAC3D

#### 5.1.4. Elección del Modelo Constitutivo

FLAC3D cuenta con 15 modelos constitutivos predefinidos, cada uno desarrollado para representar un comportamiento específico, siendo utilizados principalmente con el objetivo de resolver problemas relacionados a la ingeniería geotécnica.

Para elegir correctamente un modelo constitutivo, el Manual de FLAC3D recomienda tener en cuenta dos consideraciones:

1. La información que se tiene sobre el material que desea modelarse.
2. La aplicación que se le dará al modelo.

Además, considerando los modelos constitutivos utilizados para el diseño de los túneles interstación de la Línea 3 del Metro de Santiago, se opta por trabajar con los modelos constitutivos Mohr-Coulomb y Cysoil. Ambos modelos permiten representar el comportamiento del suelo frente a excavaciones subterráneas, con diferentes niveles de precisión.

Si bien, es posible realizar el modelo numérico considerando sólo el modelo constitutivo Cysoil, también se debe utilizar el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, ya que, a pesar de ser un modelo más sencillo, permite obtener resultados certeros considerando parámetros que generalmente son mucho más fáciles de determinar. Es por esta razón, y debido a la rápida ejecución de los programas, que es el modelo constitutivo más utilizado en modelación geotécnica.

### 5.1.5. Propiedades del Material

En esta sección se presentan las propiedades elásticas y resistentes consideradas en el modelo.

#### Propiedades Elásticas:

Tanto Mohr-Coulomb como Cysoil asumen un comportamiento isotrópico en el rango elástico, descrito por dos constantes: el módulo volumétrico ( $K$ ) y el módulo de corte ( $G$ ). Estas constantes se utilizan en FLAC3D, y se obtienen a partir de los valores del módulo de elasticidad ( $E$ ) y del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). A continuación, se detallan los valores de las constantes mencionadas anteriormente.

#### a) Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad se obtuvo a partir del estudio de mecánica de suelos elaborado por Pestrus, consultora geotécnica.

$$E = 20000 + 2750 \cdot Z \quad (21)$$

Dónde  $Z$  es la profundidad medida desde la superficie. Luego, se considera un módulo de elasticidad lineal que aumenta con la profundidad.

#### b) Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es un parámetro característico de cada material que proporciona una medida del estrechamiento que sufre el material cuando se estira longitudinalmente.

En suelos, el coeficiente de Poisson puede variar entre 0,15 y 0,45. Específicamente, en suelos finos, el coeficiente de Poisson asume valores entre 0,20 y 0,40. Debido a esto último es que se ha optado por trabajar con el valor definido por Pestrus, considerando un coeficiente de Poisson de 0,3.

#### c) Módulo Volumétrico

El módulo volumétrico mide la resistencia de un material. Específicamente, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dado.

A continuación, se presenta la ecuación que permite calcular el módulo volumétrico a partir del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson (ICG, 2013).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (22)$$

#### d) Módulo de Corte

El módulo de corte indica la relación entre una fuerza cortante y la deformación angular que esta fuerza provoca.

A continuación, se presenta la ecuación que permite calcular el módulo de corte a partir del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson (ICG, 2013).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (23)$$

#### Propiedades Resistentes:

Tanto el modelo Mohr-Coulomb como Cysoil, siguen el criterio de falla Mohr-Coulomb, el cual considera una superficie de falla lineal para la falla al corte (ICG, 2013).

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (24)$$

Dónde  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal mayor,  $\sigma_3$  el esfuerzo principal menor,  $c$  la cohesión,  $\phi$  es el ángulo de fricción y  $N_\phi$  una constante cuyo valor depende del ángulo de fricción. Cabe destacar que, las dos constantes que definen la resistencia del suelo,  $c$  y  $\phi$ , se determinan a partir de ensayos triaxiales.

Cómo el criterio de falla Mohr-Coulomb pierde validez al aumentar los esfuerzos, la superficie se extiende a una región de tensión, tal que el esfuerzo principal menor es igual al esfuerzo tensional,  $\sigma^t$ .

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (25)$$

Es importante tener en cuenta que el esfuerzo tensional no puede exceder el valor del esfuerzo principal menor. De hecho, el máximo valor que puede adoptar es:

$$\sigma_{m\acute{a}x}^t = \frac{c}{\tan(\phi)} \quad (26)$$

Considerando las propiedades elásticas y resistentes presentadas anteriormente, se tiene que, para realizar el modelo numérico en FLAC3D se utilizarán los parámetros geotécnicos definidos en la Sección 3.2.2., tanto para el modelo Mohr-Coulomb como para Cysoil (Tablas 3-3 y 3-4).

### 5.1.6. Secuencia Constructiva

Para modelar la secuencia constructiva se utilizan comandos que permiten modelar tanto la excavación, como el sostenimiento y revestimiento del túnel. Para modelar la excavación se utiliza el comando '*model null*', que redefine las zonas como '*null zones*' o zonas nulas, por lo que se utiliza para representar material removido o excavado, mientras que para modelar el sostenimiento y revestimiento del túnel se utiliza el comando '*shell*', que simula el efecto estabilizador.

Luego, para encontrar una solución estática se debe encontrar el estado de equilibrio de cada etapa constructiva, por lo que se utiliza el comando '*so/ve*', que considerando una serie de '*steps*' o pasos, permite encontrar el estado de equilibrio de fuerzas, que, por defecto, ocurre cuando la mayor fuerza no balanceada alcanza un valor menor o igual a  $10^{-5}$ .

Ya definidos los comandos a utilizar se procede a modelar la secuencia constructiva, presentada en la Sección 3.4. Sin embargo, para facilitar la modelación del problema se han modificados algunos pasos. A continuación, se presentan las cuatro fases constructivas consideradas en el modelo, las cuales consideran avances de 2 [m], con tal de agilizar el cálculo computacional.

Fase I (bóveda):

1. Inicialmente, en  $y=30$ , se excava en bóveda un tramo de aproximadamente 4 [m], dejando un contrafuerte temporal de terreno sin excavar. Se excavan 4 [m] para poder aplicar el sostenimiento correctamente, pero ya iniciada la excavación, los avances en bóveda son de aproximadamente 2 [m].
2. Se excava en contrafuerte un tramo de aproximadamente 2 [m],
3. Se coloca hormigón, en los 2 [m], hasta alcanzar un espesor de 0,25 [m] (sostenimiento).
4. Se repiten los pasos desde el 1 hasta el 3 hasta completar 8 [m].

Fase II (contrabóveda):

5. Se excava un tramo de 2 [m] en contrabóveda.
6. Se coloca hormigón, en los 2 [m], hasta alcanzar un espesor de 0,40 [m] (revestimiento).

Fase III (bóveda y contrabóveda):

7. Se repiten los pasos anteriores, exceptuando el paso 4., hasta alcanzar una longitud de 90 [m].

Fase IV (bóveda):

8. Se debe hormigonar revestimiento en bóveda y paredes. Esta fase se debe realizar lo más cerca del frente de excavación sin interferir en el ciclo normal de avance, por lo que se decidió aplicar un revestimiento de 0,15 [m] a 10 [m] de la frente.

Finalmente, considerando la secuencia constructiva y los comandos mencionados anteriormente, se logra modelar la excavación del túnel (Figura 5-6).

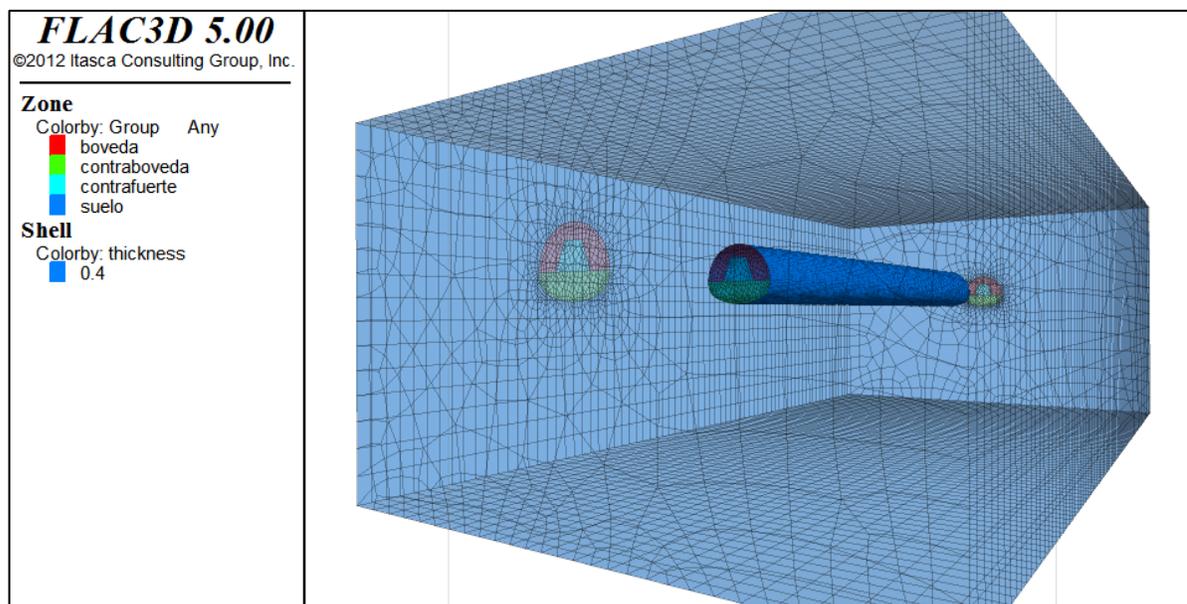


Figura 5-6: Excavación del túnel, FLAC3D

## 5.2. Resultados e Interpretación

A partir de los modelos generados, tanto para el modelo constitutivo Mohr-Coulomb como para Cysoil, se obtuvieron las curvas de asentamientos superficiales y subsuperficiales producto de la construcción de los túneles interestación del tramo en estudio.

### 5.2.1. Asentamientos Superficiales

Como se mencionó anteriormente, es posible determinar los asentamientos superficiales a partir de los modelos numéricos desarrollados en FLAC3D. A continuación, en la Figura 5-7, se presenta el comportamiento del suelo en superficie para Mohr-Coulomb, siendo posible observar un aumento en las deformaciones cuando estas se acercan al eje central del túnel. Cabe destacar que en el programa los asentamientos se miden en metros, al igual que sus resultados.

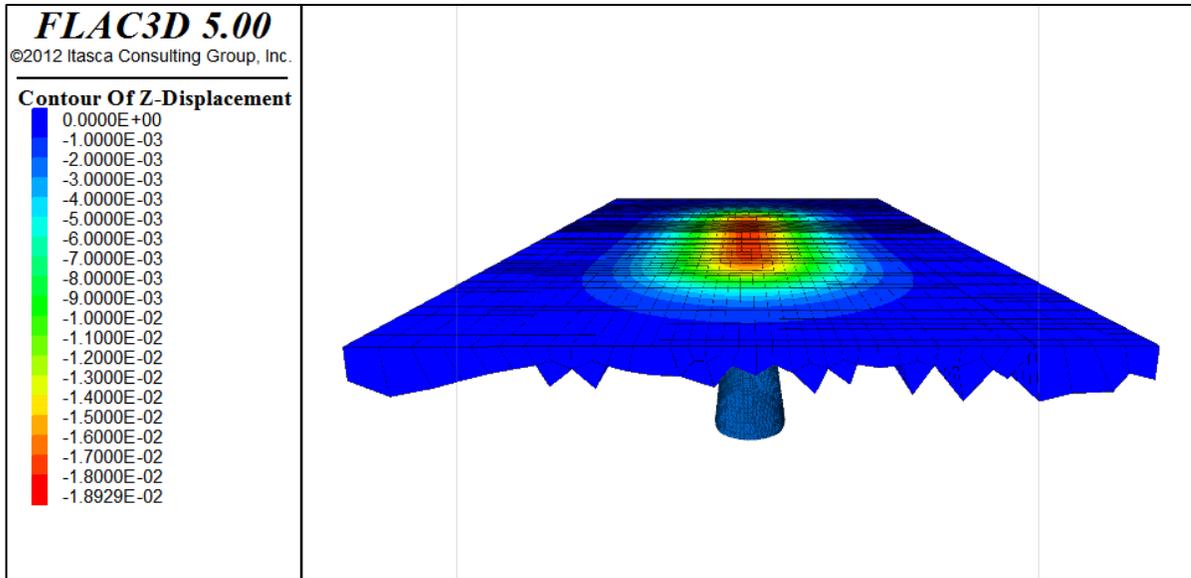


Figura 5-7: Asentamientos superficiales en metros, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A, FLAC3D

Luego, se tiene que los asentamientos superficiales máximos se producen en el eje central del túnel, justo en el centro de la malla. Para obtener un perfil detallado de dónde se encuentra el asentamiento máximo se utiliza la función *'profiles'*, que permite obtener el perfil de asentamiento superficial transversal en la mitad del trazado ( $y=75$ ). Luego, se presenta la curva de asentamientos obtenida para el modelo Mohr-Coulomb, específicamente, para los túneles ubicados en el trazado en recta.

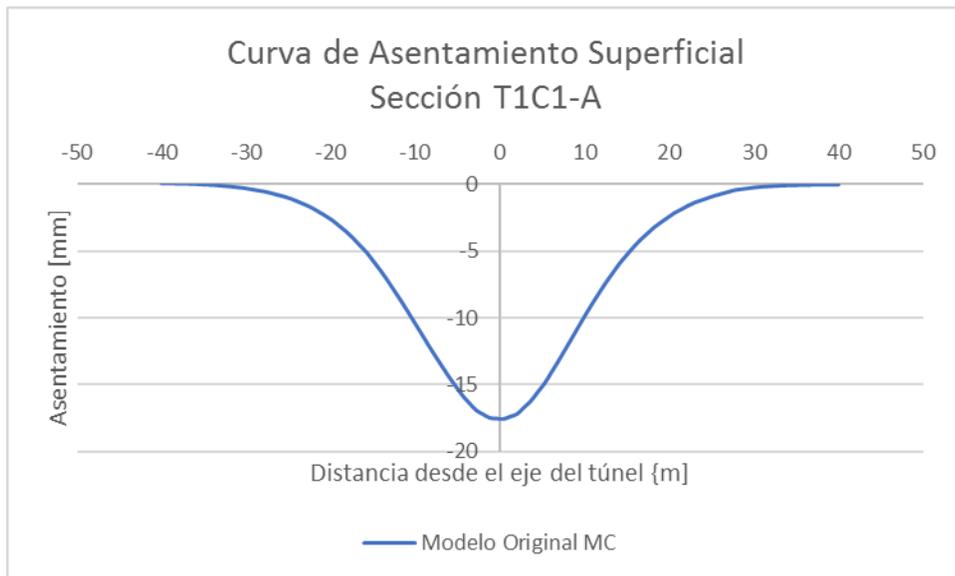


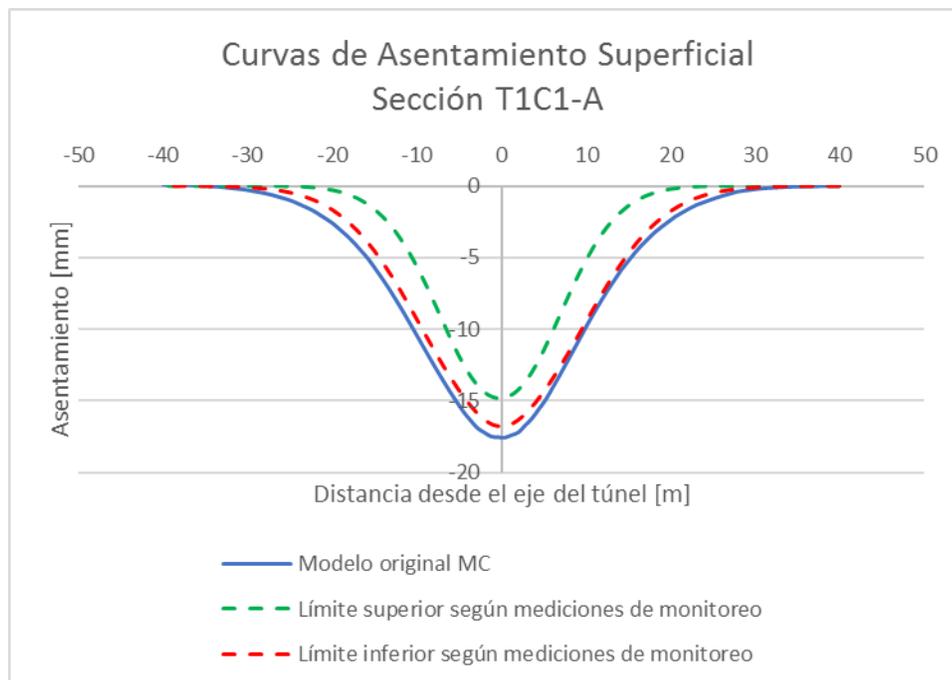
Figura 5-8: Curva de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A

De los perfiles de asentamientos superficiales es posible determinar el asentamiento máximo obtenido tanto para el modelo Mohr-Coulomb como para Cysoil. A continuación, se presentan los asentamientos máximos obtenidos para los diferentes modelos constitutivos, considerando dos geometrías, la del túnel en el trazado recto y la del túnel en el trazado curvo.

**Tabla 5-2: Asentamientos superficiales según modelo numérico**

Modelo	Modelo Constitutivo	Geometría del Túnel	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]
1	Mohr-Coulomb	T1C1-A	-17,5
2	Cysoil	T1C1-A	-15,6
3	Mohr-Coulomb	T4C1-A	-18,4
4	Cysoil	T4C1-A	-16,3

Los asentamientos presentados en la Tabla 5-2 difieren de los obtenidos en monitoreo (Sección 4.1.), ya que estos últimos varían entre -14,8 y -16,7 [mm], para las secciones dónde el túnel posee geometría T1C1-A, y entre -14,6 y -21 [mm] para las secciones dónde el túnel posee geometría T4C1-A. Luego, se presentan los gráficos de asentamientos superficiales, dónde se observan las curvas determinadas a partir de monitoreo, y las obtenidas mediante el modelo numérico.



**Figura 5-9: Comparación curvas de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A**

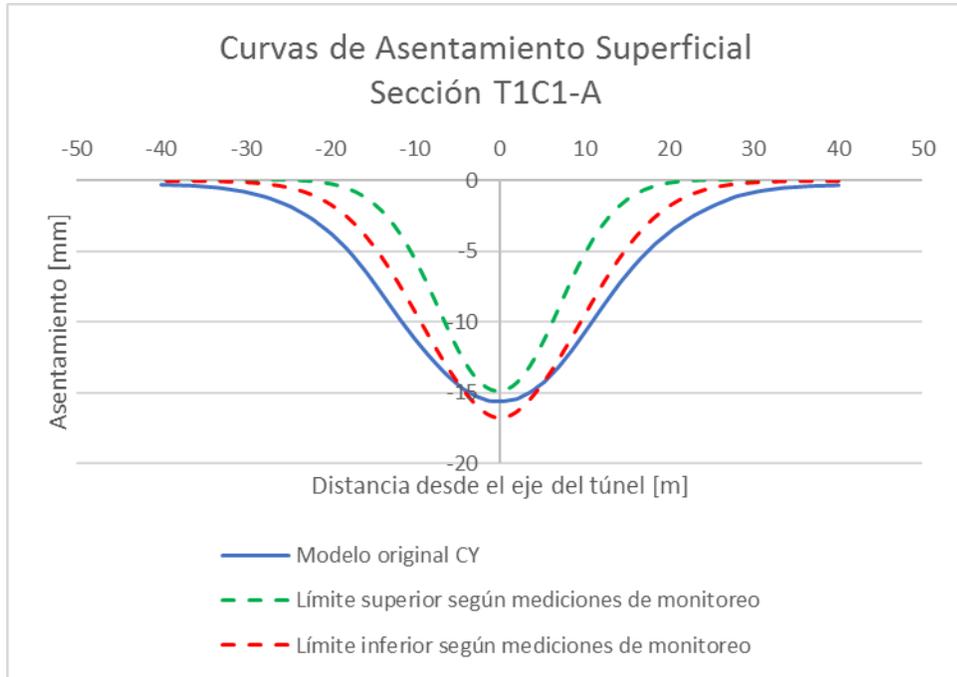


Figura 5-10: Comparación curvas de asentamiento superficial, Cysoil, sección T1C1-A

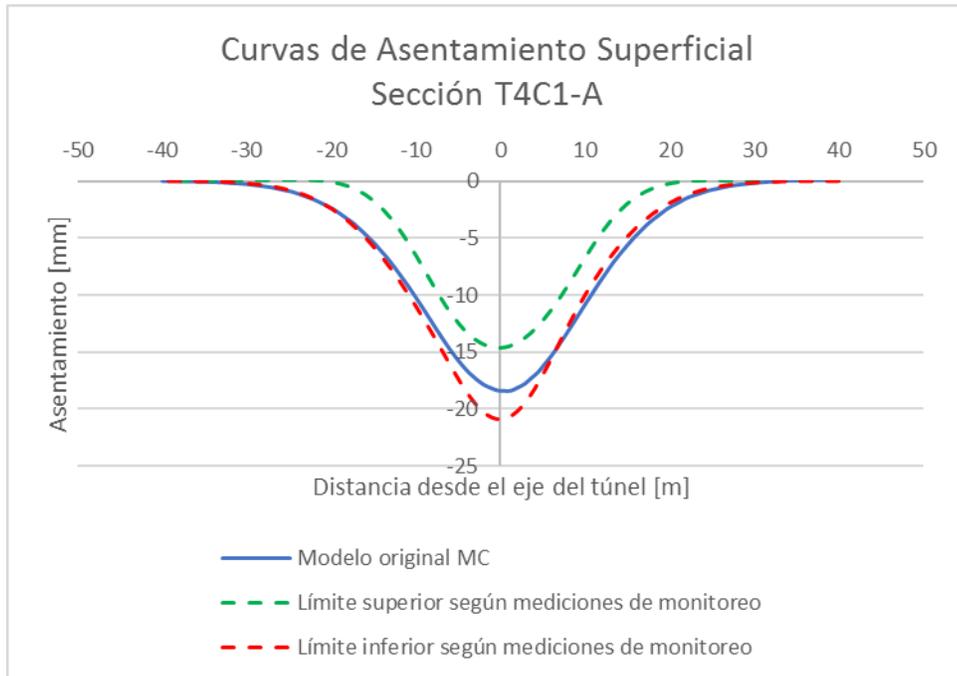


Figura 5-11: Comparación curvas de asentamiento superficial, Mohr-Coulomb, sección T4C1-A

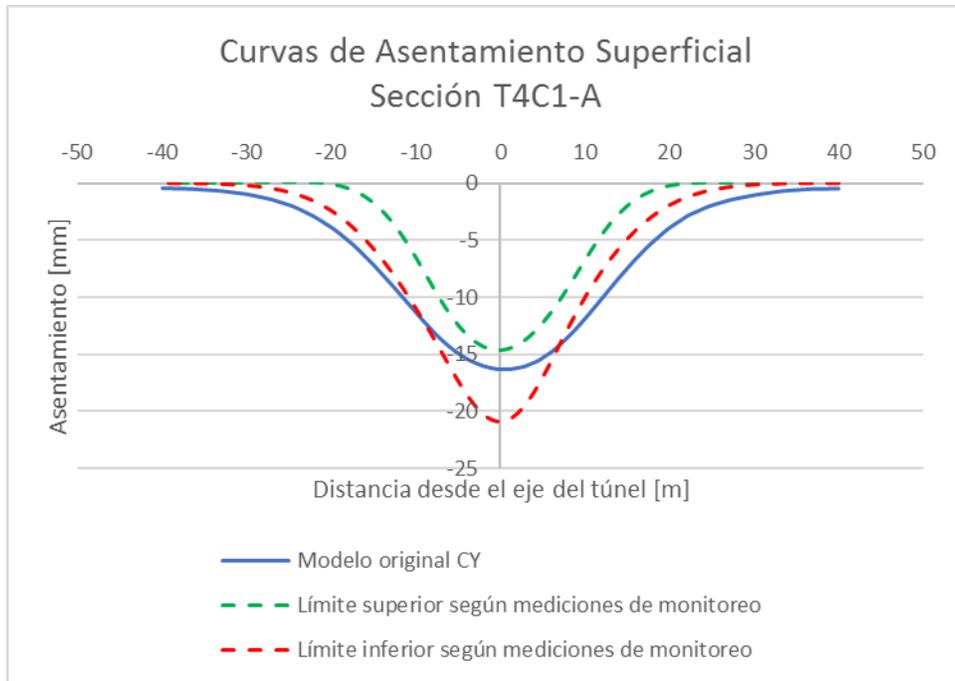


Figura 5-12: Comparación curvas de asentamiento superficial, Cysoil, sección T4C1-A

Luego, se realiza un *back analysis* del modelo, con tal de determinar los parámetros de entrada que permiten representar con mayor precisión el comportamiento del suelo en estudio.

### 5.2.2. Asentamientos Subsuperficiales

En forma análoga a la Sección anterior, se determinan los asentamientos de los puntos subsuperficiales a partir de los modelos numéricos. A continuación, en la Figura 5-13, se presenta el comportamiento del suelo alrededor del túnel para Mohr-Coulomb, siendo posible observar mayores deformaciones en la clave del túnel. Cabe destacar que, las deformaciones se presentan en metros.

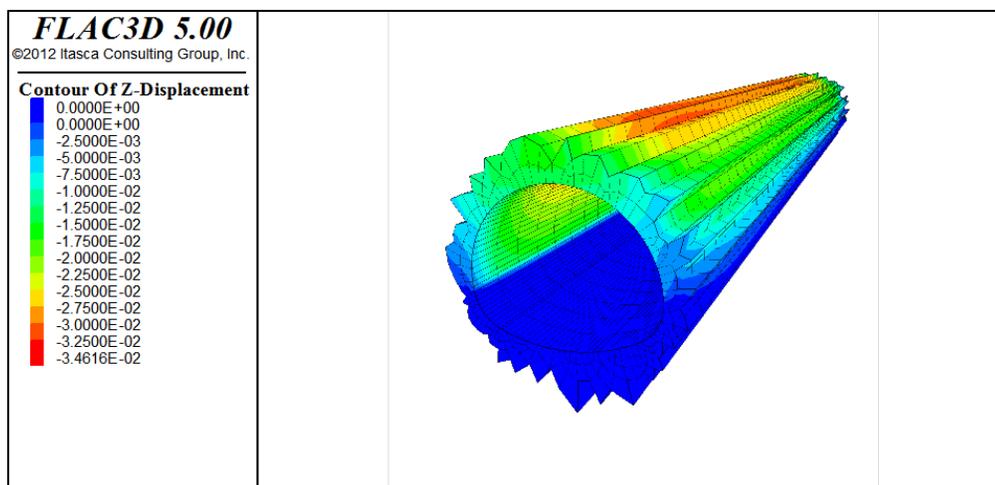


Figura 5-13: Deformaciones alrededor del túnel, Mohr-Coulomb, sección T1C1-A, FLAC3D

Luego, para obtener el asentamiento máximo que se produce en los puntos subsuperficiales se utiliza la función *'profiles'*, la cual permite determinar el valor exacto de la deformación que se produce un metro sobre la clave del túnel, justo en la mitad de su trazado ( $y=75$ ). A continuación, en la Tabla 5-3 se presentan los asentamientos de los puntos subsuperficiales obtenidos para los diferentes modelos constitutivos, considerando las geometrías T1C1-A y T4C1-A.

Tabla 5-3: Asentamientos en puntos subsuperficiales

Modelo	Modelo Constitutivo	Geometría del Túnel	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]
1	Mohr-Coulomb	T1C1-A	-33,8
2	Cysoil	T1C1-A	-20,2
3	Mohr-Coulomb	T4C1-A	-34,5
4	Cysoil	T4C1-A	-21,2

Las deformaciones presentadas en la Tabla 5-3, muestran una gran diferencia entre los resultados obtenidos con Mohr-Coulomb y Cysoil. La deformación obtenida con el modelo que considera la sección que se encuentra en el trazado recto y Cysoil, es similar a la deformación registrada en monitoreo, aprox. 20 [mm], mientras que la deformación que arroja el modelo que considera Mohr-Coulomb sobrepasa este valor en más de 10 [mm]. Cabe destacar que, a pesar de no contar con el asentamiento subsuperficial registrado en monitoreo para la sección T4C1-A, las deformaciones obtenidas con ambos modelos también difieren en aproximadamente 10 [mm].

Si bien se podrían estimar los parámetros de entrada que permiten obtener deformaciones similares a las registradas en monitoreo, estas últimas no son suficientes como para realizar un estudio, por lo que no se realizará un *back analysis* del modelo para los asentamientos en profundidad. A pesar de esto, la deformación del punto subsuperficial Pk 1+988 obtenida en monitoreo se utilizará para validar los parámetros geotécnicos ya estimados.

## 6. Back Analysis

Como se observan variaciones entre las deformaciones superficiales registradas en monitoreo, y las obtenidas a partir del modelo numérico, se realiza un *back analysis* de este último, considerando variaciones del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, además de su análisis.

### 6.1. Back Analysis del Modelo Numérico

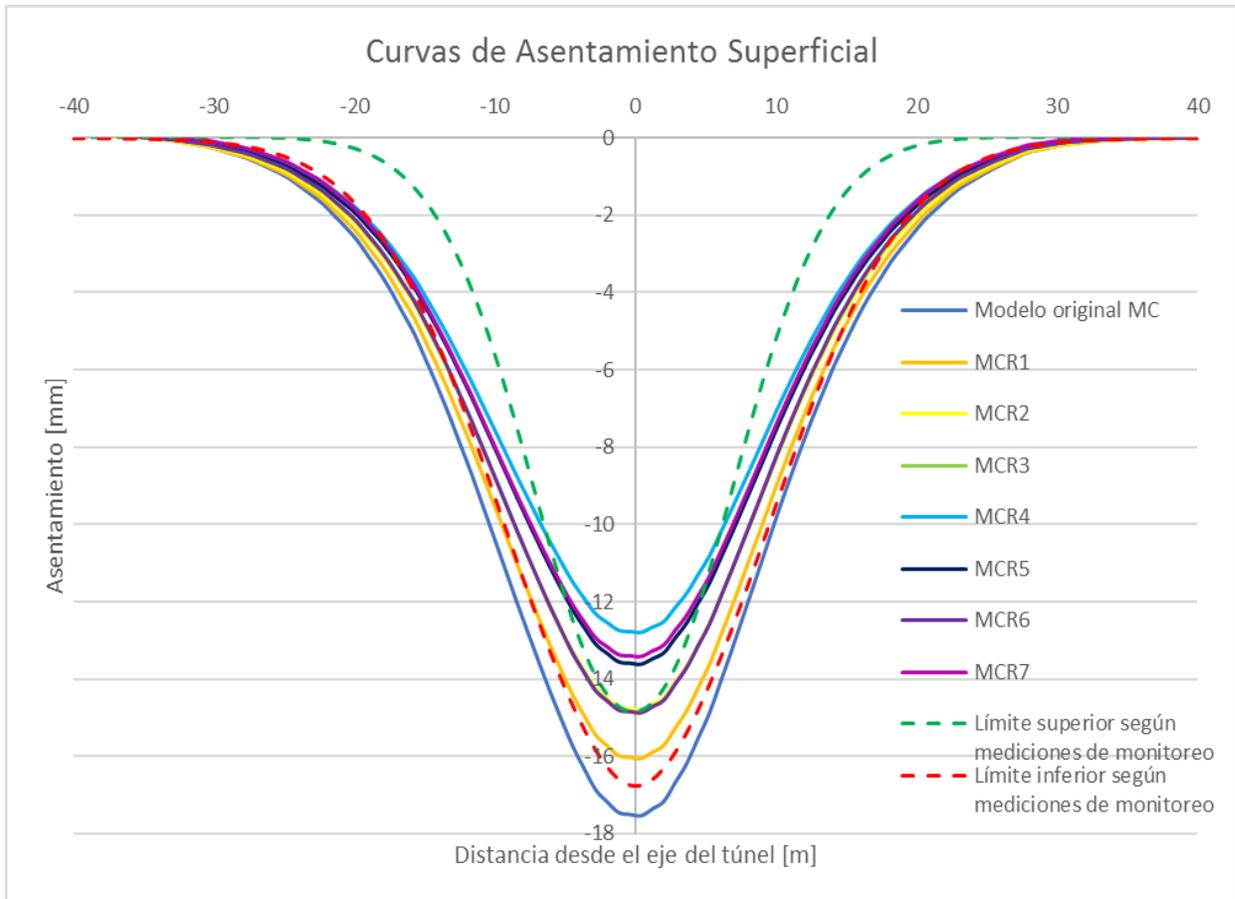
Para estimar los parámetros geotécnicos del suelo se crean modelos que consideran un espectro de variaciones del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, permitiendo determinar las configuraciones que mejor representan el comportamiento real del suelo.

Luego, se presentan los resultados del back analysis del modelo numérico que considera los túneles que se encuentran en el trazado recto. En la Tabla 6-1 y en la Figura 6-1 se presentan los asentamientos superficiales obtenidos al considerar el modelo constitutivo Mohr-Coulomb.

Tabla 6-1: Back analysis para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A

Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$	$\delta_{m\acute{a}x} [mm]$
MCR1	1,1xE	0,65	0,45	-16,0
MCR2	1,2xE	0,65	0,45	-14,8
MCR3	1xE	0,75	0,55	-14,9
MCR4	1xE	0,85	0,65	-12,8
MCR5	1,1xE	0,75	0,55	-13,6
MCR6	0,9xE	0,85	0,65	-14,9
MCR7	0,8xE	0,95	0,75	-13,4

A partir de los resultados de la Tabla 6-1 se determinan las configuraciones que alcanzan asentamientos máximos dentro del rango esperado, sin embargo, es importante que toda la curva de asentamientos se encuentre dentro de los límites superior e inferior, luego, utilizando la Figura 6-1, se tiene que las configuraciones que mejor representan el comportamiento del suelo son MCR2, MCR3 y MCR6. Cabe destacar que, en la Figura 6-1 no se observan las curvas de asentamientos obtenidas para los modelos MCR2 y MCR3, esto debido a la superposición de la curva obtenida con el modelo MCR6.

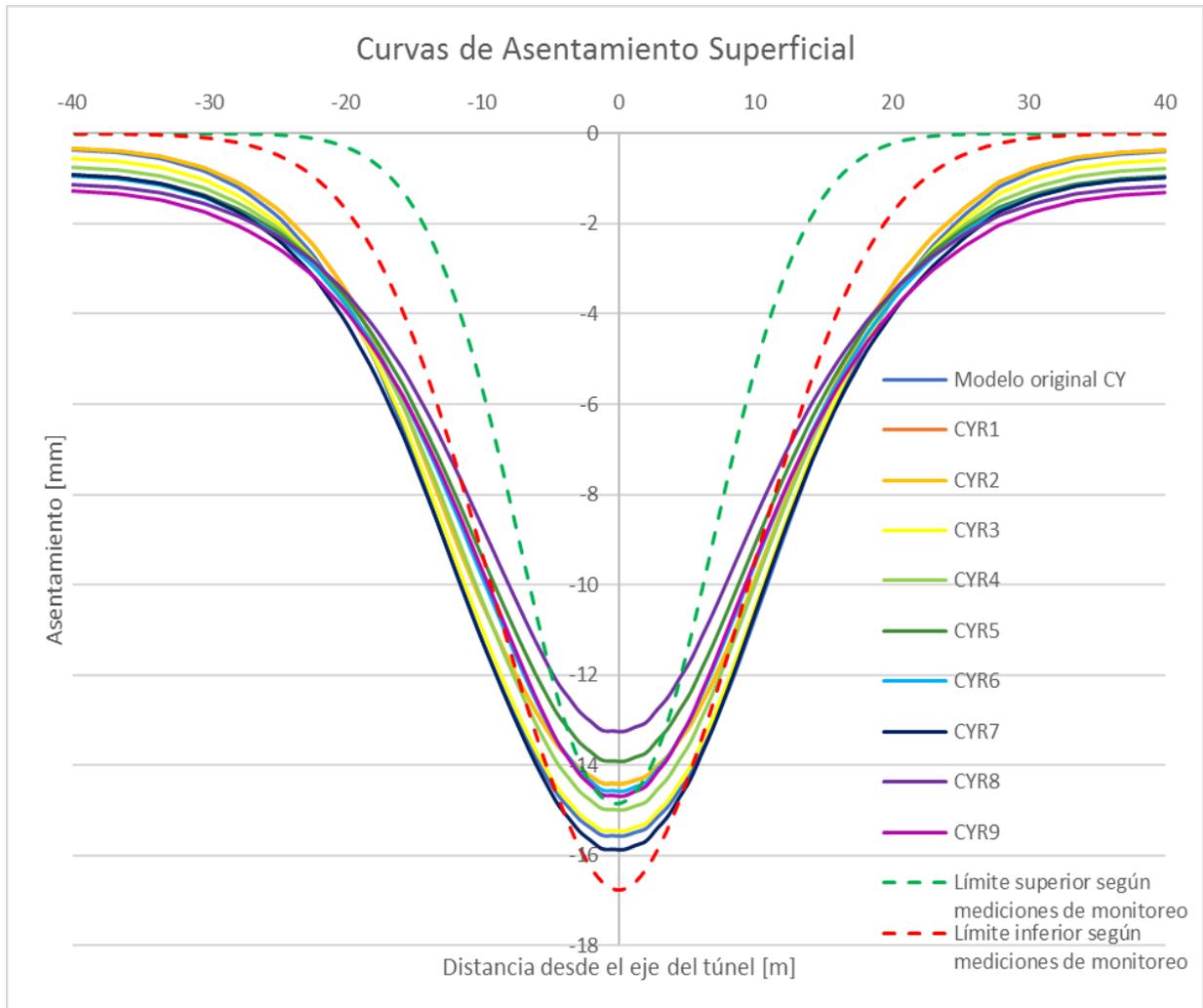


**Figura 6-1: Back analysis para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A**

Siguiendo con el *back analysis* realizado para los túneles que se encuentran en el trazado recto, se presentan los resultados obtenidos al considerar el modelo constitutivo Cysoil (Tabla 6-2 y Figura 6-2).

**Tabla 6-2: Back analysis para Cysoil, sección T1C1-A**

Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$	$\delta_{m\acute{a}x} [mm]$
CYR1	1,1xE	0,65	0,45	-14,4
CYR2	1,2xE	0,65	0,45	-14,4
CYR3	1xE	0,75	0,55	-15,5
CYR4	1xE	0,85	0,65	-15,0
CYR5	1xE	0,95	0,75	-13,9
CYR6	0,95xE	0,95	0,75	-14,6
CYR7	0,9xE	0,75	0,75	-15,9
CYR8	0,9xE	1,00	0,85	-13,2
CYR9	0,8xE	1,00	0,85	-14,7



**Figura 6-2: Back analysis para Cysoil, sección T1C1-A**

Realizando el mismo análisis mencionado anteriormente, se tiene que al observar las curvas de asentamiento para Cysoil, estas resultan tener una mayor desviación estándar que las obtenidas en monitoreo (mayor amplitud), es por esta razón que, para determinar las configuraciones que mejor representan el comportamiento del suelo, se analizará la zona central de la curva, en otras palabras, aquella zona que se encuentra justo sobre el eje central del túnel y dónde se producen los asentamientos más grandes. A continuación, en la Figura 6-3 se presenta en detalle la zona central de la curva de asentamientos, la cual considera 10 [m] a la derecha y 10 [m] a la izquierda desde el eje central del túnel. Luego, se tiene que las configuraciones que mejor representan el comportamiento del suelo son CYR1, CYR4, CYR6 y CYR9. Cabe destacar que, en la Figura 6-3 no se observa la curva de asentamientos obtenida para el modelo CYR1, ya que la curva de asentamientos del modelo CYR2 se encuentra sobre esta. Si bien ambas curvas tienen la misma forma, sólo se considerará como modelo estimado CYR1, ya que considera una menor variación del módulo de elasticidad.

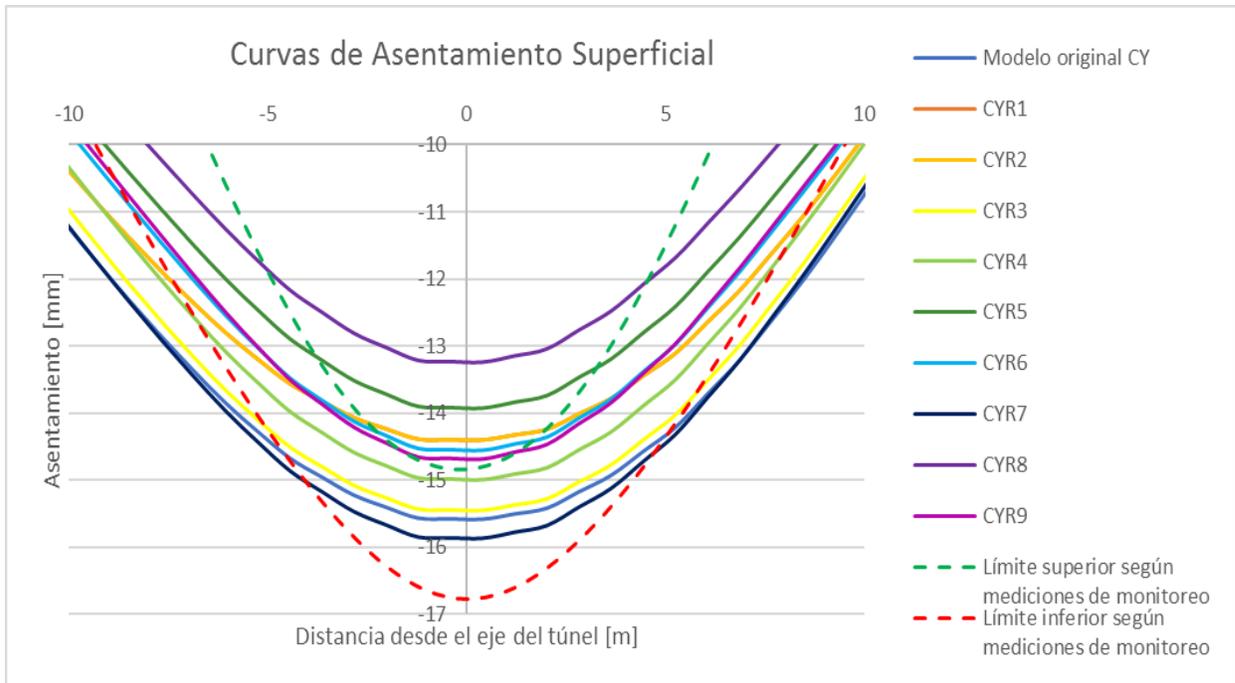


Figura 6-3: Detalle del back analysis de Cysoil, sección T1C1-A

Considerando los resultados obtenidos del back analysis del modelo numérico que considera los túneles que se encuentran en el trazado recto, se estiman los parámetros geotécnicos para los túneles en el trazado curvo. En la Tabla 6-3 y en la Figura 6-4 se presentan los resultados obtenidos al considerar el modelo constitutivo Mohr-Coulomb.

Tabla 6-3: Back analysis para Mohr-Coulomb, sección T4C1-A

Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$	$\delta_{m\acute{a}x} [mm]$
MCC1	1,1xE	0,65	0,45	-16,9
MCC2	1,2xE	0,65	0,45	-15,6
MCC3	1xE	0,75	0,55	-15,6
MCC4	0,9xE	0,85	0,65	-14,7

Siguiendo el mismo análisis, se tiene que las configuraciones que mejor representan comportamiento del suelo son MCC1, MCC2 y MCC3. Es importante mencionar que, en la Figura 6-4 no se observa la curva de asentamientos obtenida para el modelo MCC2, ya que la curva de asentamientos del modelo MCC3 se encuentra sobre esta.

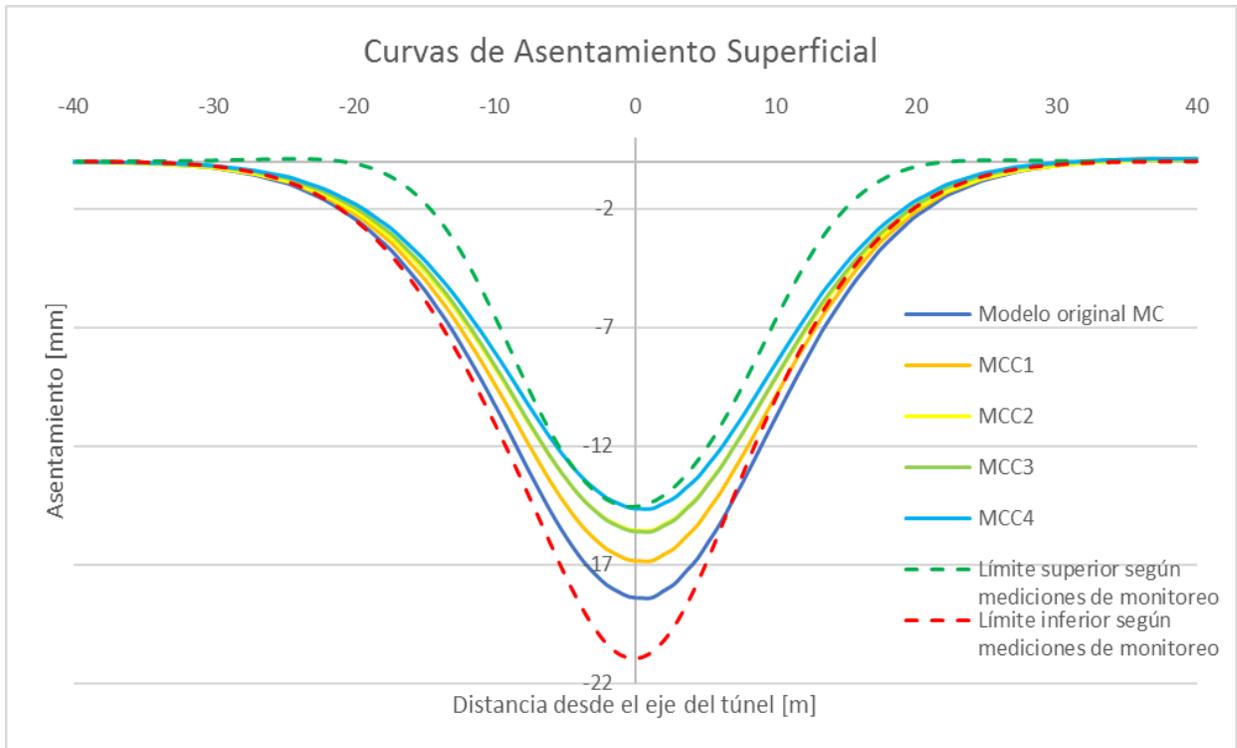
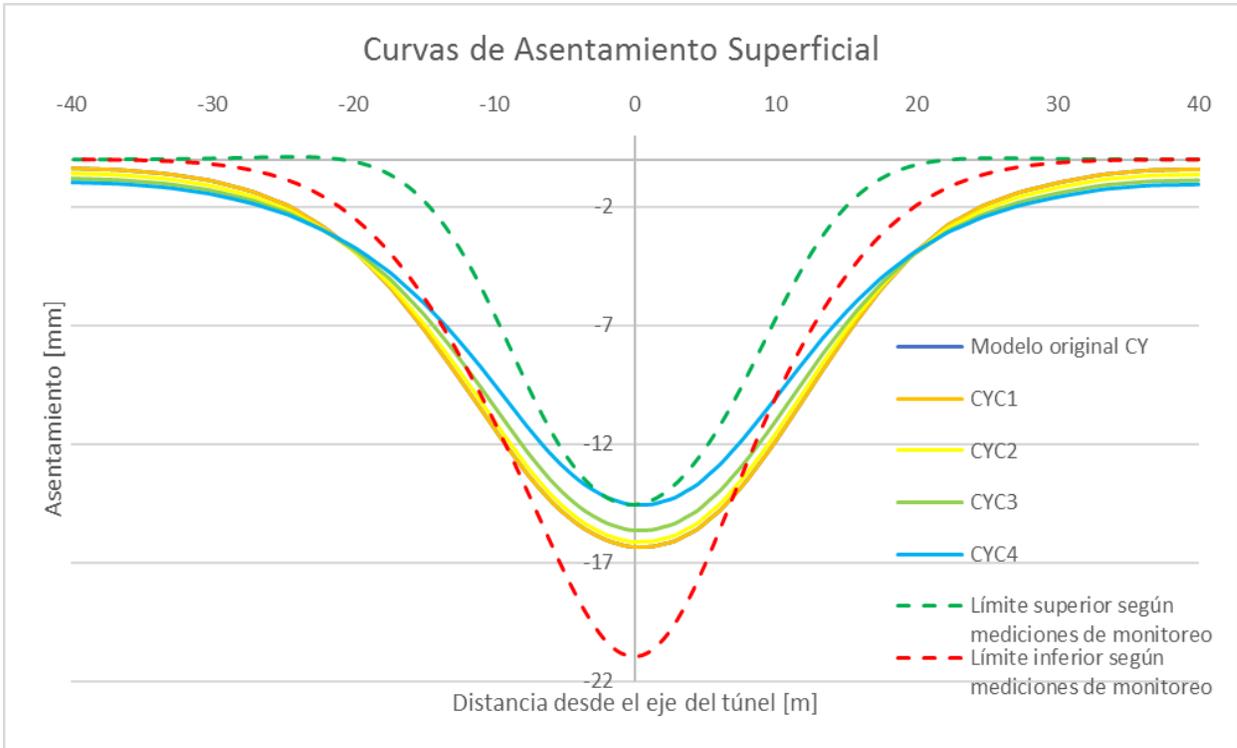


Figura 6-4: Back analysis para Mohr-Coulomb, sección T4C1-A

Siguiendo con el back analysis del modelo numérico que considera los túneles que se encuentran en el trazado curvo, se presentan los resultados obtenidos al considerar el modelo constitutivo Cysoil (Tabla 6-4 y Figura 6-5).

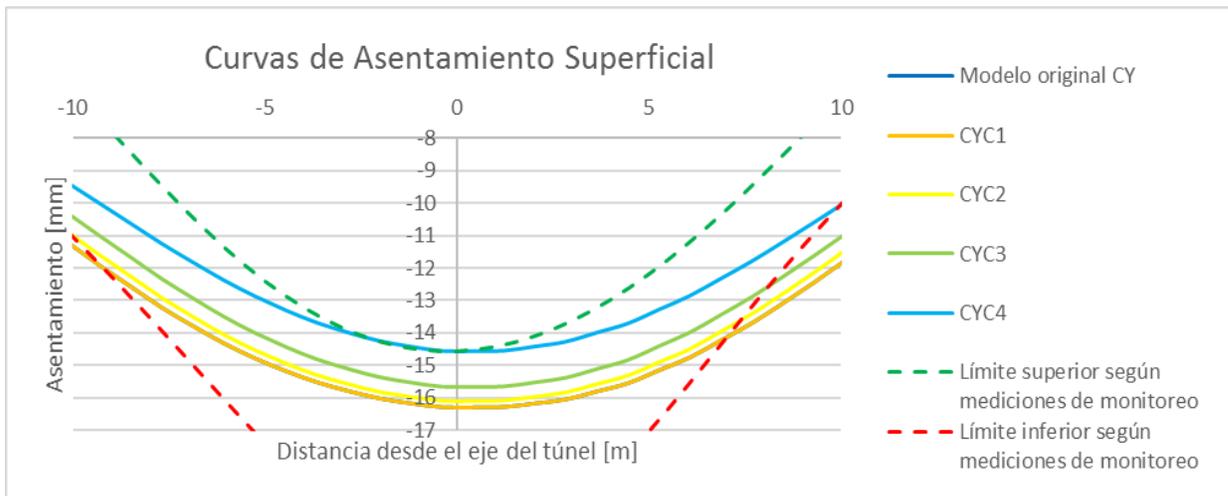
Tabla 6-4: Back analysis para Cysoil, sección T4C1-A

Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$	$\delta_{m\acute{a}x} [mm]$
CYC1	1,1xE	0,65	0,45	-16,3
CYC2	0,9xE	0,75	0,55	-16,1
CYC3	1xE	0,85	0,65	-15,7
CYC4	1xE	0,95	0,75	-14,6



**Figura 6-5: Back analysis para Cysoil, sección T4C1-A**

Al observar las curvas de asentamiento para el modelo Cysoil, se tiene que estas, igual que en el *back analysis* del modelo numérico que considera los túneles que se encuentran en el trazado curvo, presentan mayor desviación estándar que las obtenidas en monitoreo. Siguiendo el mismo análisis, se presenta en detalle la zona central de la curva de asentamientos (Figura 6-6). Luego, se tiene que todas las configuraciones logran representar el comportamiento del suelo, específicamente, la zona que considera 10 [m] a la derecha y 10 [m] a la izquierda desde el eje central del túnel.



**Figura 6-6 Detalle del back analysis de Cysoil, sección T4C1-A**

Después de estimar los parámetros geotécnicos para los túneles que se encuentran en los trazados recto y curvo, se tienen configuraciones que logran representar las deformaciones reales del suelo, independiente de la geometría del túnel. A continuación, y a modo de resumen, se presentan dichas configuraciones.

**Tabla 6-5: Back anlysis para Mohr-Coulomb y Cysoil**

Modelo Constitutivo	Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$
Mohr-Coulomb	MC1	1,2xE	0,65	0,45
	MC2	1xE	0,75	0,55
Cysoil	CY1	1,1xE	0,65	0,45
	CY2	1xE	0,85	0,65

## 6.2. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza para determinar cómo afectan las variaciones de los parámetros de entrada del modelo, a los resultados. Una de sus principales funciones es definir la importancia que posee cada parámetro, y por lo mismo, cuanto esfuerzo debe dedicarse a su medición o muestreo.

Para realizar este análisis se utilizarán los resultados de la sección anterior, ya que, para determinar cómo varía el asentamiento máximo, es necesario contar con los valores de las deformaciones obtenidas con cada configuración.

En este estudio, el análisis de sensibilidad se lleva a cabo mediante un análisis de regresión lineal. Este es un procedimiento estadístico que permite predecir los valores de una variable dependiente, en este caso el asentamiento, a partir de los valores de variables independientes, generando, además, una medida cuantitativa de sensibilidad de estas últimas.

A continuación, se presenta la Ecuación (27), la cual representa el comportamiento del análisis de regresión lineal, donde  $\gamma$  es la variable dependiente del modelo,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  son las variables independientes y  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  son parámetros fijos y desconocidos que representan la influencia que tiene cada parámetro de entrada en el modelo.

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (27)$$

Luego, utilizando la ecuación anterior, es posible realizar el análisis de sensibilidad para una o más variables independientes.

### 6.2.1. Análisis de Sensibilidad para una Variable

En este caso, la Ecuación (27) queda:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 x_1 \quad (28)$$

Por lo que para determinar los valores de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  se grafican los valores de las variables obtenidos en el *back analysis*, y se genera la línea de tendencia. A continuación, se presenta el análisis de sensibilidad del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, considerando sólo los asentamientos máximos calculados para los túneles que se encuentran en el trazado en recta.

#### a) Análisis de Sensibilidad: Módulo de elasticidad

Considerando los asentamientos superficiales se realiza el análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad, tanto para el modelo Mohr-Coulomb, como para Cysoil. Cabe destacar que, para este análisis se realizaron variaciones entre 0% y 20% del valor original del módulo de elasticidad, manteniendo constante los valores del empuje en reposo (0,65 y 0,45 para el estrato superior e inferior, respectivamente).

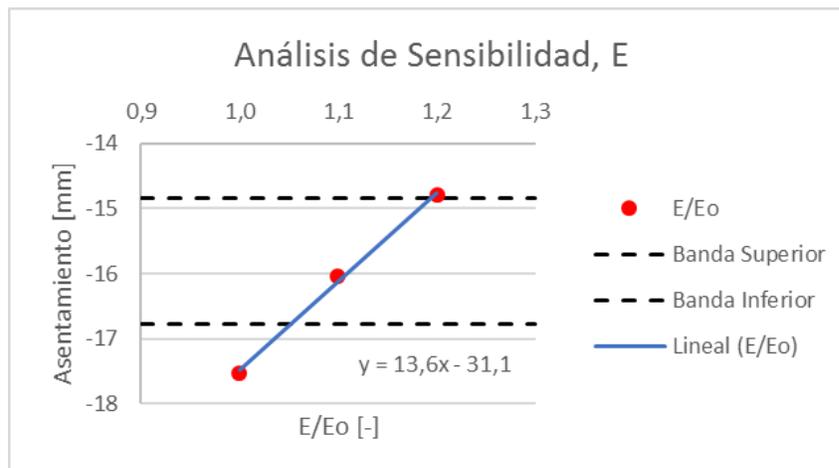


Figura 6-7: Análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad, Mohr-Coulomb

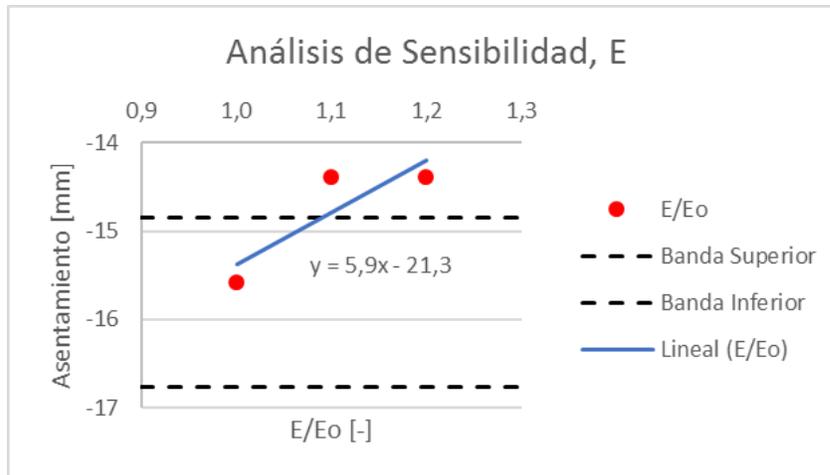


Figura 6-8: Análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad, Cysoil

De los resultados obtenidos en la Sección 5.2.1. se tiene que los asentamientos obtenidos para Mohr-Coulomb son mayores a los esperados (Figura 5-9). Luego, para estimar el modelo se debe aumentar el valor del módulo de elasticidad.

En la Figura 6-7 se observa el comportamiento esperado, ya que al aumentar el módulo de elasticidad entre un 0% y un 20% se obtienen asentamientos menores. Además, del análisis de sensibilidad se obtiene un factor de 13,6 y una ecuación que representa fielmente la muestra.

Con respecto al modelo Cysoil, el asentamiento máximo obtenido originalmente se encuentra dentro del rango esperado (Figura 5-10). Luego, para determinar la sensibilidad del módulo de elasticidad se aumenta su valor.

En la Figura 6-8 se observa que al aumentar el módulo de elasticidad en un 10%, el asentamiento ya no se encuentra dentro del rango deseado. Además, del análisis de sensibilidad se obtiene un factor de 5,9, que, como se observa, subestima la sensibilidad del parámetro, especialmente cuando se produce un aumento entre el 7% y el 20%, ya que en este rango el asentamiento se mantiene prácticamente constante. Luego, para el rango que se encuentra entre las bandas límites, es decir, entre el 0% y el 7%, se obtiene un factor de 11,8.

Por último, los factores de sensibilidad obtenidos para el modelo Mohr-Coulomb y Cysoil, específicamente, al aumentar el módulo de elasticidad entre un 0% y un 7% en este último, son bastante similares, siendo el factor calculado para Mohr-Coulomb un 15% mayor al de Cysoil.

## b) Análisis de Sensibilidad: Coeficiente de empuje en reposo

A continuación, se presenta en forma gráfica el análisis de sensibilidad para el coeficiente de empuje en reposo, considerando variaciones sobre el valor promedio entre el estrato superior e inferior, y manteniendo el valor del módulo de elasticidad constante (valor original).

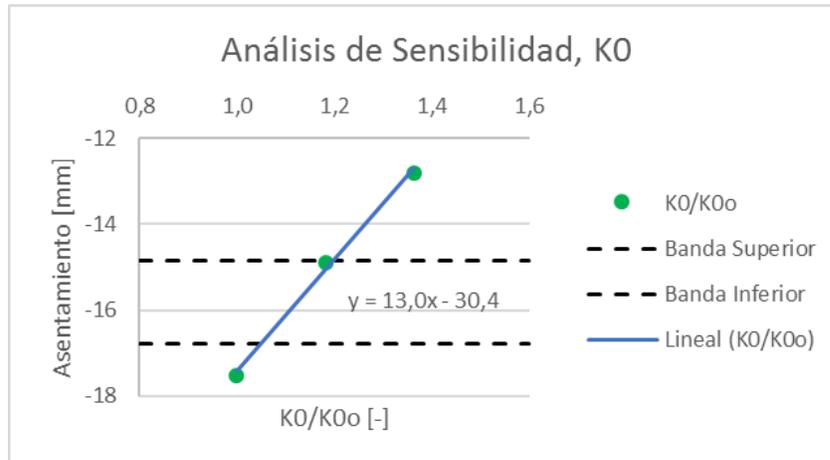


Figura 6-9: Análisis de sensibilidad para el coeficiente de empuje en reposo, Mohr-Coulomb

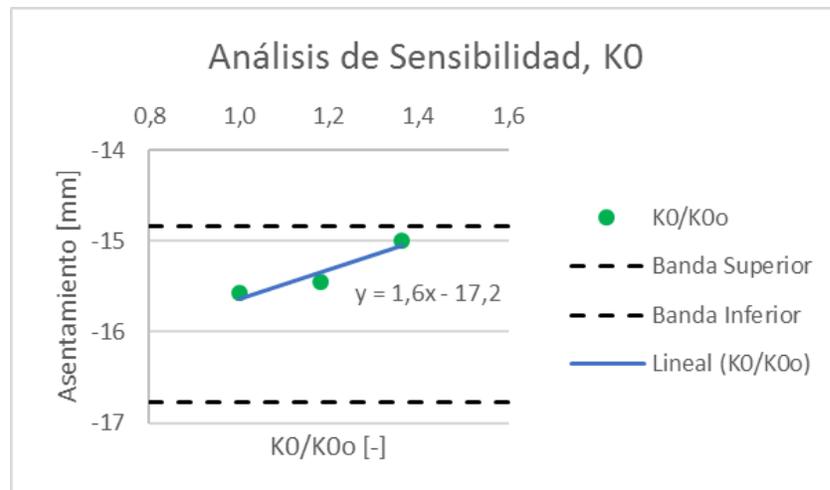


Figura 6-10: Análisis de sensibilidad para el coeficiente de empuje en reposo, Cysoil

Como se mencionó en el análisis de sensibilidad del módulo de elasticidad, los asentamientos obtenidos para Mohr-Coulomb son mayores a los esperados, por lo que para estimar el modelo se debe aumentar el valor del coeficiente de empuje en reposo.

En la Figura 6-9 se observa el comportamiento esperado, ya que al aumentar el coeficiente de empuje en reposo entre 0,0 y 0,2 se obtienen asentamientos menores, sin

embargo, al realizar un aumento de más de 0,1, el asentamiento ya no se encuentra dentro del rango esperado. Además, del análisis de sensibilidad se obtiene un factor de 13,0 y una ecuación que representa fielmente la muestra.

Con respecto al modelo Cysoil, el asentamiento máximo obtenido originalmente se encuentra dentro del rango esperado. Luego, para determinar la sensibilidad del coeficiente de empuje en reposo se aumenta su valor.

En la Figura 6-10 también se observa el comportamiento esperado. Además, del análisis de sensibilidad se obtiene un factor de 1,6 y una ecuación que logra representar el comportamiento de la muestra.

Luego, los factores de sensibilidad obtenidos para el modelo Mohr-Coulomb y Cysoil difieren bastante, siendo el factor calculado para Mohr-Coulomb 8 veces más grande que el de Cysoil. Esto quiere decir que el modelo Mohr-Coulomb es mucho más sensible, ya que al aumentar en 0,1 el coeficiente de empuje en reposo, el asentamiento disminuye en 2,4 [mm] para Mohr Coulomb, y en 0,3 [mm] para Cysoil.

### 6.2.2. Análisis de Sensibilidad para dos Variables

En este caso, la Ecuación (27) queda:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (29)$$

Dónde las variables  $x_1$  y  $x_2$  corresponden al módulo de elasticidad y el coeficiente de empuje en reposo, respectivamente.

Luego, considerando los asentamientos máximos calculados para los túneles que se encuentran en el trazado en recta, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} \\ \gamma_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \beta_2 x_{22} \\ &\dots \\ \gamma_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} \end{aligned} \quad (30)$$

Además, este sistema puede expresarse usando notación matricial.

$$\gamma = X\beta \quad (31)$$

Dónde:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Luego, para realizar el análisis de sensibilidad basta con calcular el vector  $\beta$ , el cual se determina utilizando el método de mínimos cuadrados.

$$\beta = (x^T x)^{-1} x^T \gamma \quad (33)$$

Considerando los asentamientos superficiales obtenidos en la Sección 5.1. y las ecuaciones anteriores, se realiza el análisis de sensibilidad para el módulo de elasticidad y el coeficiente de empuje en reposo. A continuación, se presentan los vectores y las matrices obtenidas, tanto para el modelo Mohr-Coulomb como para Cysoil, dónde la notación de los parámetros corresponde a su variación porcentual.

- Mohr-Coulomb:

$$\gamma = \begin{bmatrix} -17,5 \\ -16,0 \\ -14,8 \\ -14,9 \\ -12,8 \\ -13,6 \\ -14,9 \\ -13,4 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1,0 & 1,0 & 1,0 \\ 1,0 & 1,1 & 1,0 \\ 1,0 & 1,2 & 1,0 \\ 1,0 & 1,0 & 1,2 \\ 1,0 & 1,0 & 1,4 \\ 1,0 & 1,1 & 1,2 \\ 1,0 & 0,9 & 1,4 \\ 1,0 & 0,8 & 1,5 \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} -41,5 \\ 12,5 \\ 11,6 \end{bmatrix} \quad (34)$$

- Cysoil:

$$\gamma = \begin{bmatrix} -15,6 \\ -14,4 \\ -14,4 \\ -15,5 \\ -15,0 \\ -13,9 \\ -8,9 \\ -14,6 \\ -15,9 \\ -13,2 \\ -14,7 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1,0 & 1,0 & 1,0 \\ 1,0 & 1,1 & 1,0 \\ 1,0 & 1,2 & 1,0 \\ 1,0 & 1,0 & 1,2 \\ 1,0 & 1,0 & 1,4 \\ 1,0 & 1,0 & 1,5 \\ 1,0 & 1,0 & 1,8 \\ 1,0 & 1,0 & 1,5 \\ 1,0 & 0,9 & 1,4 \\ 1,0 & 0,9 & 1,7 \\ 1,0 & 0,8 & 1,7 \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} -36,1 \\ 12,8 \\ 6,7 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Luego, reemplazando los valores de  $\beta$  en la Ecuación (29) se obtienen las regresiones lineales que representan el comportamiento del modelo para Mohr-Coulomb y Cysoil (Ecuaciones (36) y (37) respectivamente).

$$\gamma = -41,5 + 12,5x_1 + 11,6x_2 \quad (36)$$

$$\gamma = -36,1 + 12,8x_1 + 6,7x_2 \quad (37)$$

Del análisis de sensibilidad realizado para Mohr-Coulomb, se tiene un factor de 12,5 para el módulo de elasticidad, y 11,6 para el coeficiente de empuje en reposo. Esto quiere decir que, manteniendo fijo el valor del coeficiente de empuje en reposo, si el módulo de elasticidad se incrementa en un 10%, el asentamiento disminuye en 1,25 [mm]. Por otra parte, si se mantiene fijo el valor del módulo de elasticidad, y el coeficiente de empuje en reposo se aumenta en un 10%, el asentamiento disminuye 1,16 [mm].

Luego, de los factores obtenidos para Mohr-Coulomb se concluye que, variar el módulo de elasticidad o el coeficiente de empuje en reposo de manera independiente, genera variaciones similares en el asentamiento máximo.

Respecto al análisis de sensibilidad realizado para Cysoil, se tiene un factor de 12,8 para el módulo de elasticidad, y 6,7 para el coeficiente de empuje en reposo. Esto quiere decir que, manteniendo fijo el valor del coeficiente de empuje en reposo, si el módulo de elasticidad se incrementa en un 10%, el asentamiento disminuye en 1,28 [mm]. Por otra parte, si se mantiene fijo el valor del módulo de elasticidad, y el coeficiente de empuje en reposo se aumenta en un 10%, el asentamiento disminuye 0,67 [mm].

A diferencia del modelo Mohr-Coulomb, el modelo Cysoil resulta ser mucho más sensible a las variaciones del módulo de elasticidad que a las del coeficiente de empuje en reposo, obteniendo una relación entre los factores de sensibilidad de 2:1.

### **6.3. Análisis de Resultados**

Para estimar los parámetros geotécnicos del modelo se compararon las deformaciones superficiales registradas en monitoreo y las deformaciones obtenidas al variar los parámetros del modelo numérico.

Los gráficos obtenidos del *back analysis* se presentan en la Sección 6.1. siendo posible observar cómo varía el comportamiento del suelo al cambiar el módulo de elasticidad y el coeficiente de empuje en reposo. A partir de estos gráficos se obtuvieron las configuraciones que mejor representan la curva de asentamientos superficial obtenida en monitoreo.

De los gráficos de la Sección 6.1. se observa que tanto para Mohr-Coulomb como para Cysoil, resulta bastante difícil lograr disminuir el ancho de las curvas, especialmente para el segundo modelo constitutivo. Es por esta razón que surge la necesidad de verificar si al variar algún otro parámetro se puede obtener una curva con menor desviación estándar. A continuación, en las Tablas 6-6 y 6-7 se presentan, a modo de resumen, los asentamientos máximos obtenidos al variar la cohesión y el ángulo de fricción de forma independiente, manteniendo los valores originales del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, y considerando sólo el caso en que el túnel que se encuentra en el trazado recto.

Tabla 6-6: Variación de la cohesión

Modelo Constitutivo	Modelo	$C$ [kPa], $Z \leq 12$ [m]	$C$ [kPa], $Z > 12$ [m]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]
Mohr-Coulomb	MCCo1	20	40	-19,1
	MCCo2	40	60	-16,4
	MCCo3	50	70	-15,5
	MCCo4	60	80	-14,8
Cysoil	CYCo1	20	40	-17,6
	CYCo2	40	60	-14,2

Tabla 6-7: Variación del ángulo de fricción

Modelo Constitutivo	Modelo	$\phi$ [°], $Z \leq 12$ [m]	$\phi$ [°], $Z > 12$ [m]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]
Mohr-Coulomb	MCPHI1	34	34	-16,1
	MCPHI2	37	37	-15,0
Cysoil	CYPHI1	40	40	-15,6
	CYPHI2	50	50	-15,6

A partir de las Tablas 6-6 y 6-7 se tiene que el asentamiento máximo tiende a disminuir al aumentar los valores de la cohesión y del ángulo de fricción. Los gráficos de las curvas obtenidas se presentan en el Anexo E, por lo que se puede analizar no sólo el asentamiento máximo obtenido, sino que también la desviación estándar de las curvas. Luego, se verifica que al variar sólo la cohesión o sólo el ángulo de fricción la curva de asentamientos sigue teniendo una amplitud mayor a la esperada. Debido a esto último, se analizan el *back analysis* realizado originalmente, es decir, aquel que considera variaciones del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, ya que incorporar la cohesión o el ángulo de fricción no genera mayor variación en la desviación estándar de la curva de asentamientos.

Luego, del *back analysis* se obtuvieron 4 configuraciones que permiten representar el comportamiento del suelo, 2 de estas corresponden al modelo Mohr-Coulomb y las otras 2 al modelo Cysoil (Tabla 6-5).

Considerando los resultados del *back analysis* y el análisis de sensibilidad para una variable, se tiene que los modelos obtenidos tanto para Mohr-Coulomb como para Cysoil concuerdan con lo esperado, ya que al aumentar el módulo de elasticidad y el coeficiente de empuje en reposo se tienen asentamientos menores al obtenido originalmente, además de una curva con una amplitud menor.

Por otra parte, del análisis de sensibilidad para dos variables, se obtuvieron factores de sensibilidad similares para el modelo Mohr-Coulomb, por lo que las dos configuraciones (MC1 y MC2) son igual de válidas.

Además, en el análisis de sensibilidad para dos variables realizado para el modelo Cysoil se obtuvieron factores muy distintos, siendo el factor de sensibilidad obtenido para el módulo de elasticidad el doble que el obtenido para el coeficiente de empuje en reposo. Esto quiere decir que el modelo Cysoil es mucho más sensible a las variaciones del módulo de elasticidad. A partir de esto último, y considerando que una grava arenosa posee un coeficiente de empuje en reposo de 0,8, según el informe de mecánica de suelos de la Línea 3, se tiene que la configuración CY1 es la más apropiada para representar el comportamiento del suelo.

Luego, a modo de resumen, se presentan las configuraciones que permiten representar las deformaciones reales del suelo para los modelos Mohr-Coulomb y Cysoil.

**Tabla 6-8: Modelos estimados**

Modelo Constitutivo	Modelo	$E$	$K_0, Z \leq 12 [m]$	$K_0, Z > 12 [m]$
Mohr-Coulomb	MC1	1,2xE	0,65	0,45
	MC2	1xE	0,75	0,55
Cysoil	CY1	1,1xE	0,65	0,45

Por otra parte, como se mencionó en la Sección 5.2.2. los asentamientos de los puntos subsuperficiales obtenidos en monitoreo no fueron suficientes como para realizar un *back analysis*, sin embargo, estos sirven para validar los parámetros geotécnicos ya estimados. A continuación, se presentan los asentamientos de los puntos subsuperficiales obtenidos con cada configuración.

**Tabla 6-9: Asentamientos en puntos subsuperficiales**

Modelo Constitutivo	Modelo	Geometría del Túnel	$\delta_{m\acute{a}x} [mm]$
Mohr-Coulomb	MC1	T1C1-A	-27,7
		T4C1-A	-29,2
	MC2	T1C1-A	-28,8
		T4C1-A	-30,2
Cysoil	CY1	T1C1-A	-19,0
		T4C1-A	-21,2

A partir de las deformaciones presentadas en la Tabla 6-9, se tiene que las configuraciones definidas para Mohr-Coulomb sobreestiman en aproximadamente 10 [mm] las deformaciones reales registradas en los puntos subsuperficiales, independiente de la geometría que presenta el túnel, mientras que configuración que considera el modelo Cysoil, entrega, para la sección que se encuentra en el trazado recto, un asentamiento 0,8 [mm] mayor al registrado en terreno, validando los valores del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo estimados para Cysoil.

Las diferencias en los asentamientos de los puntos subsuperficiales obtenidos con los dos modelos constitutivos se deben a que el modelo Mohr-Coulomb, al ser un modelo

elastoplástico perfecto, no considera el efecto de rigidización producto del endurecimiento, sobreestimando las deformaciones del suelo.

Finalmente, comparando los resultados obtenidos, se tiene que todos los modelos estimados logran representar el comportamiento del suelo en superficie, específicamente la zona que se encuentra justo sobre la excavación del túnel, mientras que sólo el modelo estimado para Cysoil logra reproducir las deformaciones reales producidas en los puntos subsuperficiales.

## 7. Conclusiones

El objetivo de esta memoria es estimar los parámetros geotécnicos de los suelos finos del noroeste de Santiago, específicamente, aquellos involucrados en la construcción de los túneles interestación del tramo 1 de la Línea 3 de Metro. Para llevar a cabo el *back analysis*, se compararon las deformaciones reales del suelo obtenidas a partir de monitoreo, con las deformaciones que arrojó el modelo numérico tridimensional creado en FLAC3D. Cabe destacar que, para realizar el *back analysis* se estudiaron sólo las deformaciones superficiales, considerando dos modelos constitutivos para el suelo: (a) Mohr-Coulomb y (b) Cysoil.

### 7.1. Back Analysis y Análisis de Sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos del *back analysis*, se infiere que los modelos numéricos realizados para Mohr-Coulomb y Cysoil logran representar correctamente el comportamiento del suelo, ya que al aumentar los valores del módulo de elasticidad y del coeficiente de empuje en reposo, es decir, al considerar un suelo más resistente, las deformaciones del suelo disminuyen. Si bien, disminuyen el asentamiento máximo y la desviación estándar de la curva de asentamientos, esta última sigue siendo mayor a la esperada, razón por la cual se analizó sólo la zona central de las curvas, es decir, aquella zona que se encuentra justo sobre el túnel y dónde se producen los mayores asentamientos.

Con respecto al análisis de sensibilidad realizado para el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, se tiene que, al considerar el análisis para dos variables, se obtienen factores de sensibilidad de 12,5 para el módulo de elasticidad y de 11,6 para el coeficiente de empuje en reposo, por lo que, al tener sensibilidades parecidas, el modelo se comporta en forma similar frente a cambios porcentuales del módulo de elasticidad o del coeficiente de empuje en reposo. Por otra parte, en el análisis de sensibilidad realizado para el modelo constitutivo Cysoil, se obtuvieron, del análisis para dos variables, factores de sensibilidad de 12,8 para el módulo de elasticidad y de 6,7 para el coeficiente de empuje en reposo, siendo el primero casi el doble del segundo. Esto quiere decir que el modelo Cysoil es más sensible a las variaciones del módulo de elasticidad, ya que al aumentar éste en un 10%, el asentamiento disminuye en 1,28 [mm], mientras que si se aumenta el coeficiente de empuje en reposo en un 10%, el asentamiento disminuye 0,67 [mm].

Luego, considerando los resultados del *back analysis* y el análisis de sensibilidad se obtuvieron los modelos que permiten representar el comportamiento real del suelo, tanto para el modelo Mohr-Coulomb como para el modelo Cysoil (Tabla 7-1).

Tabla 7-1: Modelos estimados

Modelo	$E$ [kPa]		$K_0$ [-]	
	$Z \leq 12$ [m]	$Z > 12$ [m]	$Z \leq 12$ [m]	$Z > 12$ [m]
Modelo original	36500	72250	0,65	0,45
MC1	43800	86700	0,65	0,45
MC2	36500	72250	0,75	0,55
CY1	40150	79475	0,65	0,45

## 7.2. Validación de Modelos Estimados

Como las deformaciones subsuperficiales obtenidas en monitoreo no fueron suficientes como para realizar un *back analysis*, se utilizó esta información para validar los parámetros geotécnicos ya estimados. A partir de las deformaciones que arrojan los modelos, se tiene que las configuraciones definidas para Mohr-Coulomb sobreestiman en aproximadamente 10 [mm] las deformaciones reales registradas en los puntos subsuperficiales, independiente de la geometría que presenta el túnel, mientras que las deformaciones obtenidas para Cysoil resultaron ser parecidas a las registradas en monitoreo. Esta diferencia en las deformaciones subsuperficiales se debe a que el modelo constitutivo Cysoil se basa en una ley esfuerzo-deformación que permite desarrollar un aumento de la rigidez después de alcanzado el punto de fluencia, a diferencia del modelo Mohr-Coulomb, que al ser un modelo elastoplástico perfecto considera una rigidez constante, sobreestimando las deformaciones del suelo cuando este se expone a algún ciclo de descarga-recarga.

## 7.3. Conclusiones Finales

Luego, se tiene que todos los modelos estimados logran representar el comportamiento del suelo en superficie, específicamente la zona que se encuentra justo sobre la excavación del túnel, sin embargo, sólo el modelo que considera el modelo constitutivo Cysoil (CY1), y un aumento del 10% del módulo de elasticidad, logra reproducir las deformaciones reales producidas en los puntos subsuperficiales.

Cabe destacar que, este aumento del 10% del módulo de elasticidad se realiza sobre el valor considerado en el modelo original, adoptado por ARCADIS, a partir del estudio de la mecánica de suelos realizado por Petrus y la revisión de antecedentes geotécnicos de otros estudios realizados en la zona, entre ellos, los estudios de mecánica de suelos realizados en el sector norte de la Línea 2 del Metro de Santiago. Es por esta razón que se asume una buena estimación del módulo de elasticidad, teniendo en cuenta además que los diseños consideran sólo la presencia de suelos finos. Luego, se atribuye el aumento del 10% del módulo de elasticidad a la presencia aislada de lentes de arenas finas limosas y gravas.

Continuando con los resultados del *back analysis*, se tiene que para predecir en forma adecuada el comportamiento de los suelos estudiados, o de aquellos que posean parámetros geotécnicos similares, se recomienda utilizar el modelo estimado para Cysoil, ya que entrega una buena aproximación de los asentamientos máximos ocurridos en profundidad y en superficie, siempre y cuando se estudie sólo la zona que considera los 10 primeros metros hacia la izquierda y hacia la derecha, desde el eje de la excavación. Si bien es posible diseñar una obra considerando una zona mayor, las deformaciones superficiales que entregará el modelo serán mayores que las deformaciones reales del suelo, a medida que estas se alejan de la excavación, por lo que queda a criterio del ingeniero a cargo del proyecto considerar este modelo, ya que a pesar de representar correctamente el comportamiento del suelo que se encuentra cerca de la excavación, entrega, para las zonas más alejadas, deformaciones mayores a las esperadas.

## 8. Bibliografía

1. Alzate, N. 2016. Metodología para el análisis de sensibilidad de los localizadores de fallas ante los parámetros de modelado del sistema de potencia. Tesis para optar al grado de magister en ingeniería eléctrica. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.
2. Arenas, A. y Viertel, P. 2010. Análisis numérico tridimensional avanzado. Santiago.
3. Austrian Society for Geomechanics. 2010. NATM The austrian practice of conventional tunnelling. Austria. Medienfabrik Graz GmbH.
4. Bureau. 2013. Análisis de confiabilidad de la excavación del túnel de la Estación Universidad de Chile en Línea 3 de Metro de Santiago. Elaborado para CONSORCIO ARA WorleyParsons – ARCADIS.
5. Carrasco, S. 2012. Metodología de diseño para post-pillar cut & fill. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Santiago, Universidad de Chile.
6. Castro, C. 2015. Modelamiento numérico de la dilución por sobre excavación en minería subterránea explotada por sublevel stoping. Tesis para optar al grado de magíster en minería. Santiago. Universidad de Chile.
7. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2013. A. Valores umbrales monitoreo túnel interestación tramo 1. Elaborado para Metro.
8. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2013. B. Informe revisión antecedentes y validación mecánica de suelos Línea 3 Metro de Santiago. Elaborado para Metro.
9. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2013. C. Túnel interestación – Tipo T1C1-A, sección con contrabóveda en recta. Elaborado para Metro.
10. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2013. D. Túnel interestación – Tipo T4C1-A, sección con contrabóveda en curva. Elaborado para Metro.
11. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2013. E. Túnel interestación sección con contrabóveda, excavación-sostenimiento y revestimiento, secuencia constructiva. Elaborado para Metro.
12. CONSORCIO ARA WorleyParsons - ARCADIS. 2016. Retroanálisis de modelaciones FLAC3D en suelos finos de sector norte (cola de maniobras). Elaborado para Metro.
13. Fattah et al. 2010. Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground. Acta Geotechnica.

14. Gacitúa, J. 2012. Análisis cualitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile.
15. González, C. 2016. Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile.
16. González, E. 2017. The development of underground works at Metro de Santiago: half a century of history. En: Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Bergen, Norway.
17. González, S. 2016. Análisis del comportamiento de túneles excavados en roca antes cargas sísmicas mediante modelamiento numérico. Memoria para optar al título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile.
18. Hita, J. 2015. Aplicación de métodos estadísticos a ingeniería de túneles y obras subterráneas. Tesis para optar al grado de doctor en ingeniería de minas y energía. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
19. Hover et al. 2015. Short and long term tunneling induced settlements at Whitechapel Station. Ground Engineering.
20. Iglesias, R. 2014. Análisis sísmico de túneles a baja profundidad en los suelos de Santiago. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
21. ITA. 2007. Settlements induced by tunneling in Soft Ground. Tunneling and Underground Space Technology 22.
22. Itasca Consulting Group. 2013. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, User's Guide. 5th ed. Minnesota. Mill Place.
23. Lopez, J. 2002. Presentación de los programas Flac y Plaxis [en línea] Cataluña, España. <<http://upcommons.upc.edu/>>.
24. Metro. 2012. Monitoreo topográfico para la excavación de piques y túneles Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago.
25. Nabil et al. 2016. Three-Dimensional Back-Analysis of an Instrumented Shallow Tunnel Excavated by a Conventional Method. Geotech Geol Eng.
26. Nieto et al. 2009. Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
27. Oteo, C. y Rodríguez, J. 1998. Subsistencia y auscultación en los túneles del Metro de Madrid. Revista de obras públicas.

28. Piaggio, G. 2015. Diseño y construcción de túneles. En: Encuentro de túneles y espacios subterráneos para entidades académicas. Santiago, Chile. CTES.
29. Pozo et al. 2015. Santiago de Chile New Metro Line 3 – Basic and detail design, and construction early works supervisión of 22 km of tunnels in the underground of Santiago city. Santiago.
30. Pozo, J. 2015. Instrumentación de la nueva Línea 3 del Metro de Santiago. En: Seminario: Desafíos geotécnicos en Chile. Santiago, Chile.
31. Rey, M. 2016. Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnico en túneles estación e interestación del Metro de Santiago. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile.
32. Rodríguez, K. 2014. Subsidencia por la construcción de túneles en suelos blandos saturados. Tesis para optar al grado de magister en ingeniería geotecnia. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
33. Sakurai et al. 2003. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method. Tunneling and Underground Space Technology 18.
34. Uriel, E. 2013. Regresión lineal múltiple: estimación y propiedades. Valencia. Universidad de Valencia.
35. Valenzuela, G. 1978. Suelo de fundación del gran Santiago. Santiago
36. Villanueva, A. 2015. Simulación numérica de la construcción del depósito de relaves filtrados Ramahuayco y validación de los parámetros del modelo constitutivo representativo. Tesis para optar al grado de magister en ciencias con mención en ingeniería geotécnica. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería.
37. Zhao et al. 2015. Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations – The Western Scheldt tunnel case. Computers and Geotechnics.

## 9. ANEXOS

### ANEXO A: Determinación del Parámetro $\beta$ , Cysoil

$\beta$  es un factor de calibración que relaciona las curvas esfuerzo-deformación de ensayos triaxiales realizados en laboratorio y ensayos triaxiales reproducidos en FLAC3D, utilizando el modelo constitutivo Cysoil.

Debido a la falta de ensayos realizados en laboratorio, se utilizaron las curvas esfuerzo-deformación de ensayos triaxiales drenados ya calibrados, considerando el modelo constitutivo Hardening Soil. Cabe destacar que estos ensayos se realizaron para los suelos del sector norte de la Línea 3 de Metro, específicamente en el tramo de cola de maniobras (entre PK 1,095 y PK 1,330), el cual presenta una estratigrafía similar a la del tramo en estudio.

Luego, se programaron ensayos triaxiales drenados en FLAC3D para los dos estratos de suelo, considerando el modelo constitutivo Cysoil y una presión efectiva de 100 [KPa].

Ya definidas las curvas esfuerzo-deformación, se procede a calibrar el parámetro  $\beta$ . A continuación, se presentan en las Figuras 9-1 y 9-2 las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos triaxiales obtenidos en FLAC3D que mejor se aproximan a las curvas del modelo calibrado para Hardening Soil, obteniendo como resultado un factor de calibración de 0,4.

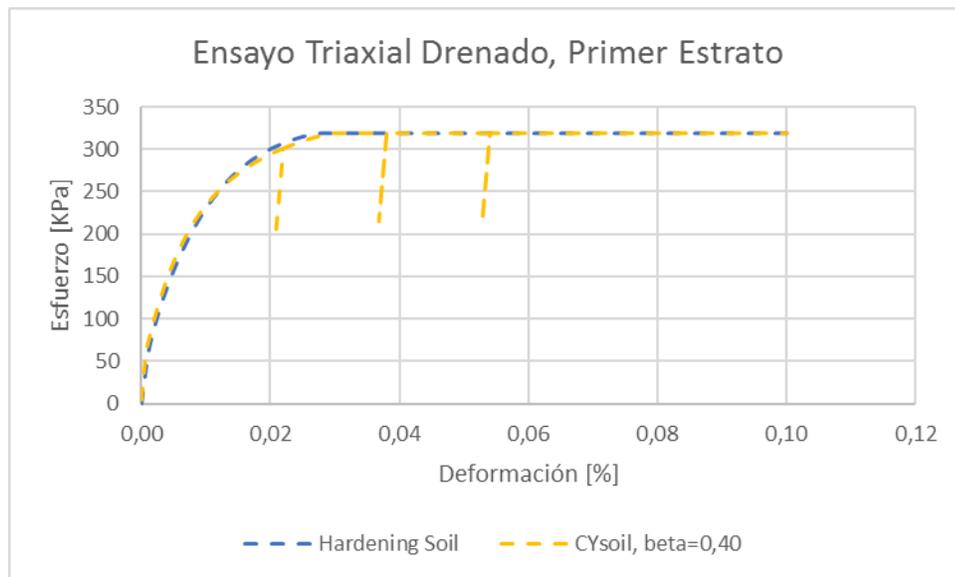
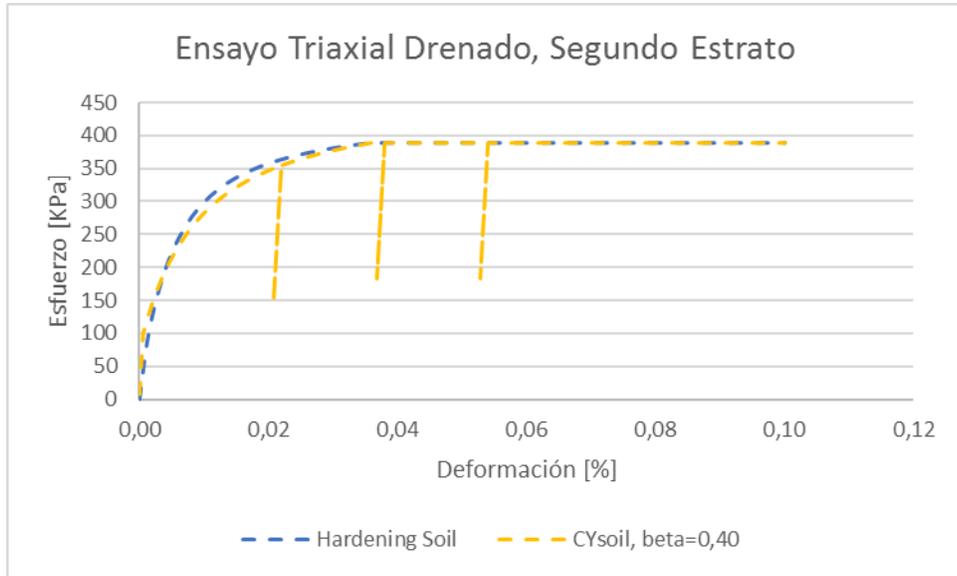


Figura 9-1: Calibración ensayo triaxial drenado, primer estrato



**Figura 9-2: Calibración ensayo triaxial drenado, segundo estrato**

## ANEXO B: Geometría de los Túneles Interestación

A continuación, se presenta en detalle la geometría de los túneles interestación ubicados en el tramo 1 de la Línea 3 de Metro. Cabe destacar que todas medidas que se encuentran en centímetros.

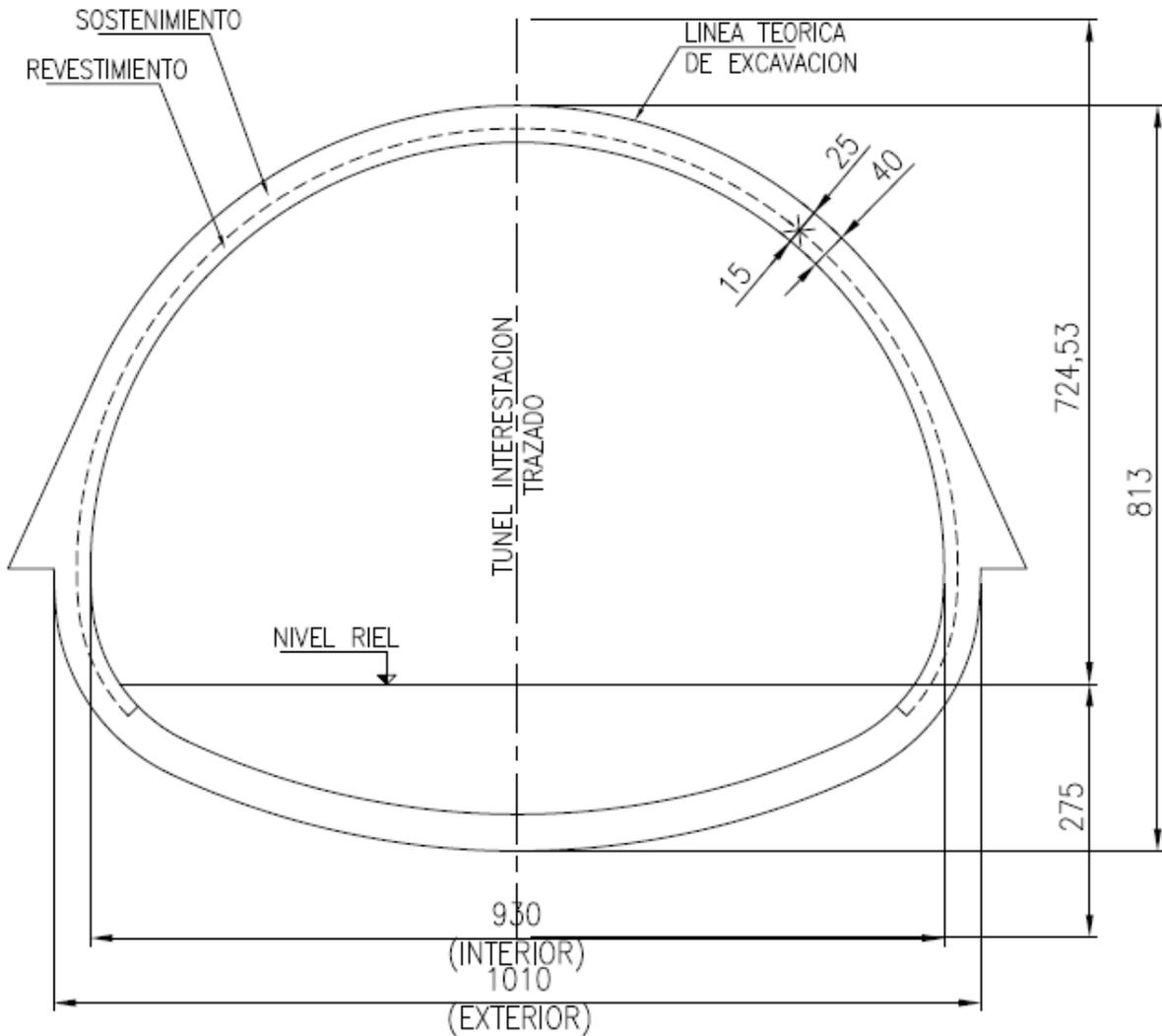
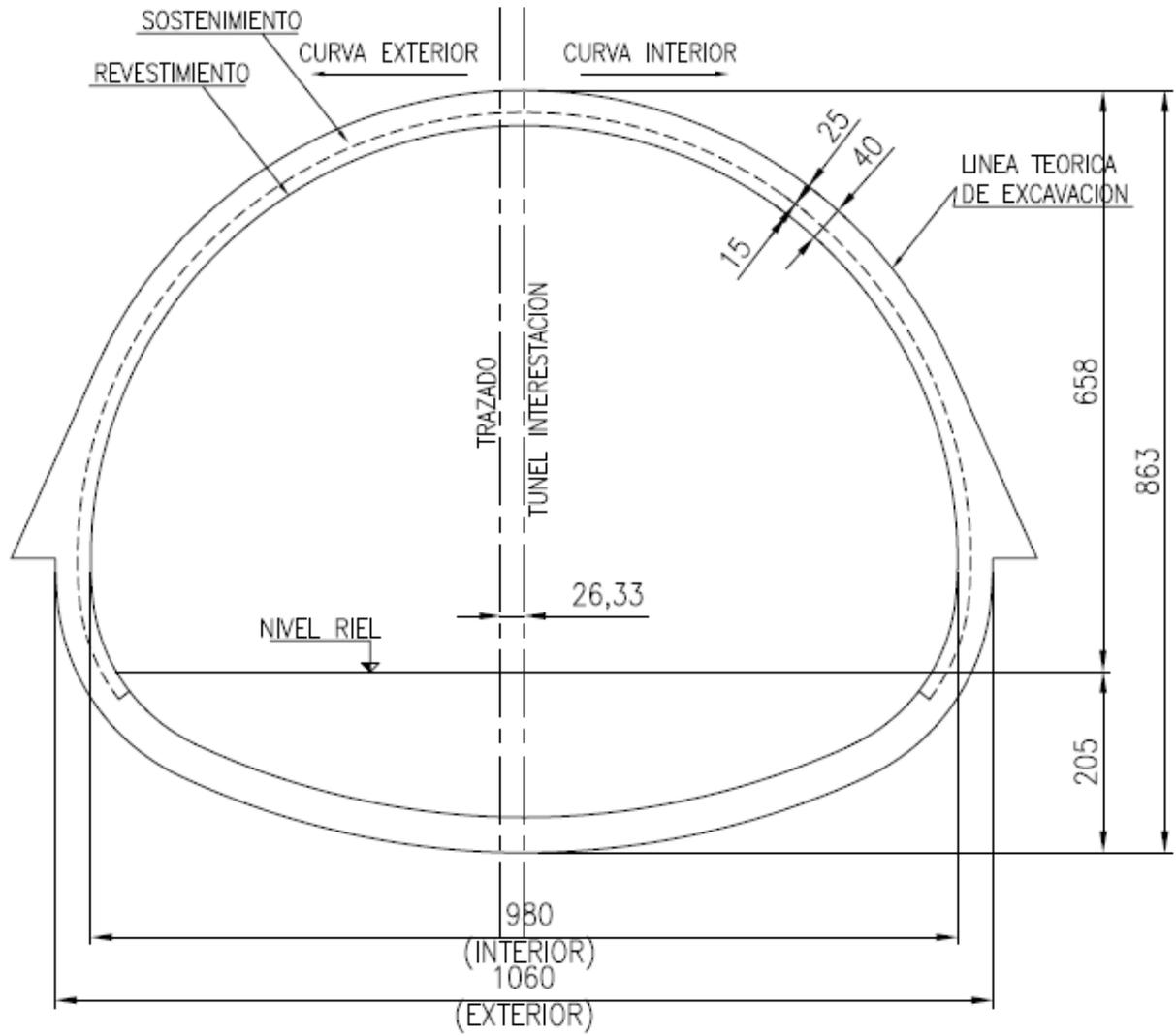


Figura 9-3: Geometría túnel interestación, sección T1C1-A



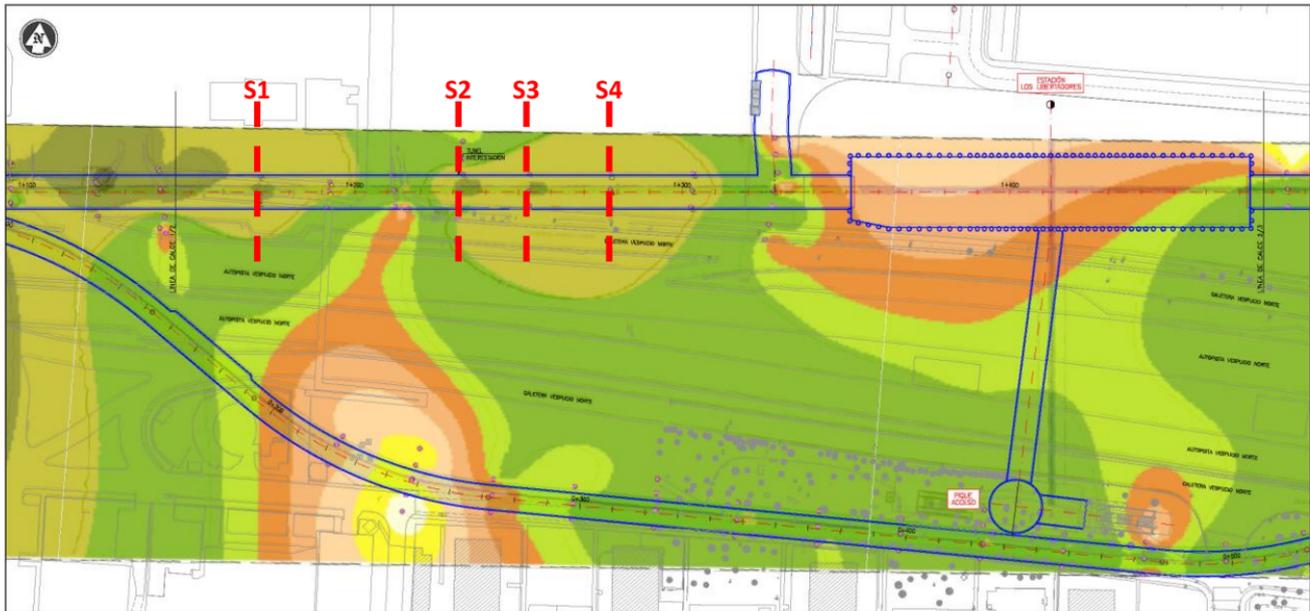
**Figura 9-4: Geometría túnel interestación, sección T4C1-A**

## **ANEXO C: Secciones de Monitoreo en Planta**

Se presentan los planos en planta con la ubicación de las secciones de monitoreo, las que se identificarán con la nomenclatura de la Tabla 9-1.

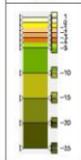
**Tabla 9-1: Sección de monitoreo**

Sección de Monitoreo	
Pk 1+171	S1
Pk 1+232	S2
Pk 1+253	S3
Pk 1+278	S4
Pk 1+988	S5
Pk 2+017	S6
Pk 2+067	S7
Pk 2+167	S8
Pk 2+262	S9
Pk 2+313	S10



PLANTA GENERAL  
ESC. 1 - 500

LEYENDA  
ASENTAMIENTOS  
(mm)



NOTAS:  
1.- INGENIEROS DE = (S.I.C.)

<b>METRO S.A.</b>	
CONTRATO DE PUESTO LINEA 3	
NOMBRE PROYECTO:	TRIN
SERVENO DE PAQUETA BOGOTÁ Y AIL TRIN	
ORDEN LI	
NOMBRE SERVIDOR METRO	TRIN
NOMBRE DE CONTRATO	FECHA DE RESPOS
	TRIN

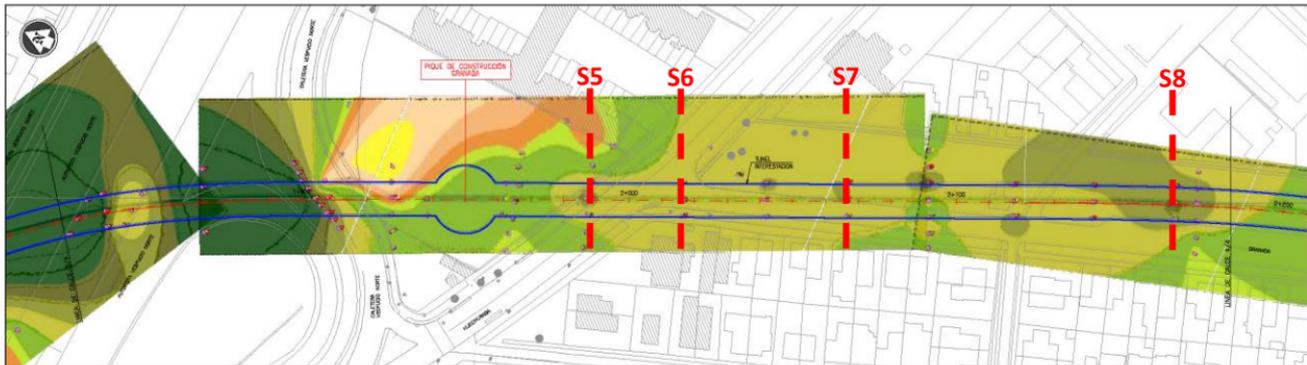
**METRO S.A.**  
INSTITUTO DE TRANSITO - SERVIDORES - PUESTO Y SERVIDOR SERVIDOR LINEA 3  
CONSORCIO WORLEYPARSONS - ARCADIS

**ARCADIS** **WORLEYPARSONS**

PROYECTO: TUNEL  
SERVIDOR # PL3-0103-01-13  
FECHA: PL3-01-03-01-13

MAPA DE CONTORNO LINEA 3	
TOMADO 1-2	
LABORA 2 DE 12	
ESCALA	FECHA
PROYECTADO	08.09.2017
REVISADO	
APPROBADO	

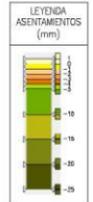
FECHA	REVISADO	REVISOR	DESCRIPCION	PROY.	DISE.	REL.	APP. AA.	APP. J.P.	ESCALA	FECHA	Nº CONTORNO	REVISADO A	REV.
A	09.09.17	ENTIDAD PARA COORDINACION INTERNA	N.P.V.										



PLANTA GENERAL  
ESC. 1 : 500



PLANTA GENERAL  
ESC. 1 : 500



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

UBICACION PROYECTO: TUNJA  
GERENCIA DE INGENIERIA DISEÑO Y ANEJOS: TUNJA  
GERENCIA L3  
UBICACION GERENCIA METRO: TUNJA  
UBICACION DE COORDINATA: FECHA DE REDISEÑO: TUNJA

**METRO S.A.**  
INSTITUTO DE ENLACE - LINEAS DISEÑO - PROYECTO Y CALIFICACION - GERENCIA LINEA 3  
CONSORCIO WORLD PARSONS ARCADIS  
**ARCADIS** **WorldParsons**

FECHA DE ELABORACION	08.09.17	REVISOR	INGENIERO	PROYECTO	PL-3-0103-01-12	HOJA	11	TITULO	MAPA DE CONTORNO LINEA 3
FECHA DE REVISIÓN		REVISOR		PROYECTO	PL-3-0103-01-12	HOJA	11	TITULO	TRAMO 1-2
FECHA DE REVISIÓN		REVISOR		PROYECTO	PL-3-0103-01-12	HOJA	11	TITULO	LÁMINA 4 DE 12
FECHA DE REVISIÓN		REVISOR		PROYECTO	PL-3-0103-01-12	HOJA	11	TITULO	

NOTAS:  
1.- DIMENSIONES EN = (M.C)

FECHA	REVISOR	DESCRIPCION	PROJ.	CALE.	REC.	APR.	APR.	FECHA	REVISOR	DESCRIPCION	PROJ.	CALE.	REC.	APR.	APR.	FECHA	REVISOR	DESCRIPCION	PROJ.	CALE.	REC.	APR.	APR.
A.	08.09.17	EMITIDO TUNJA COORDINACION INTERNA	H.P.M.																				

## ANEXO D: Curvas de Asentamiento Superficial

Gráficos no mostrados en el cuerpo, dónde se observan las curvas de asentamiento superficial obtenidas para cada sección de monitoreo.

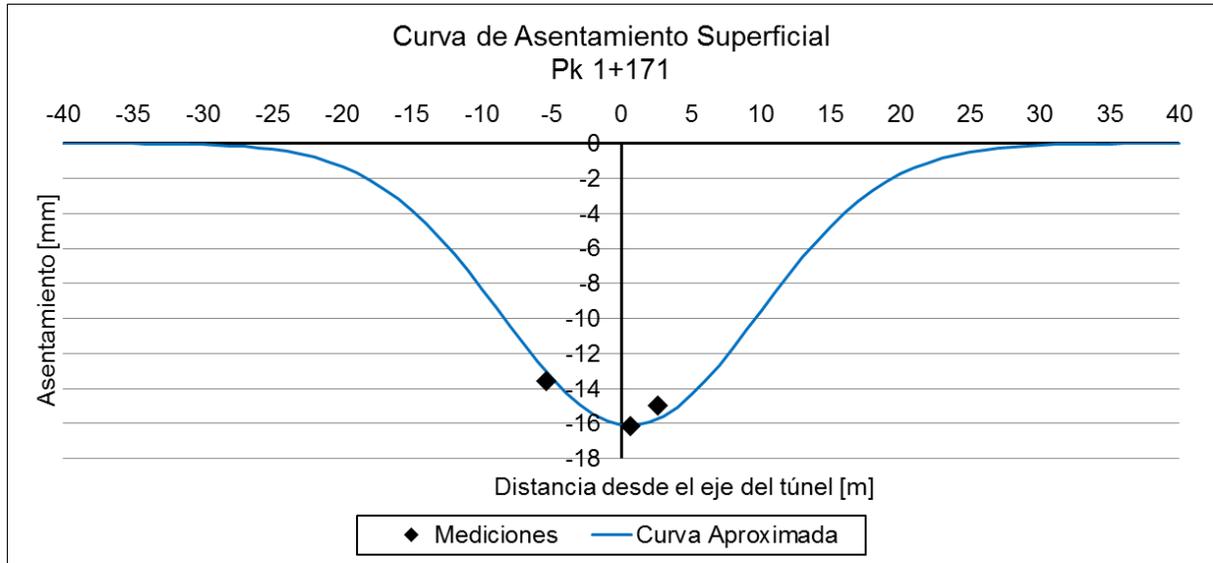


Figura 9-5: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+171

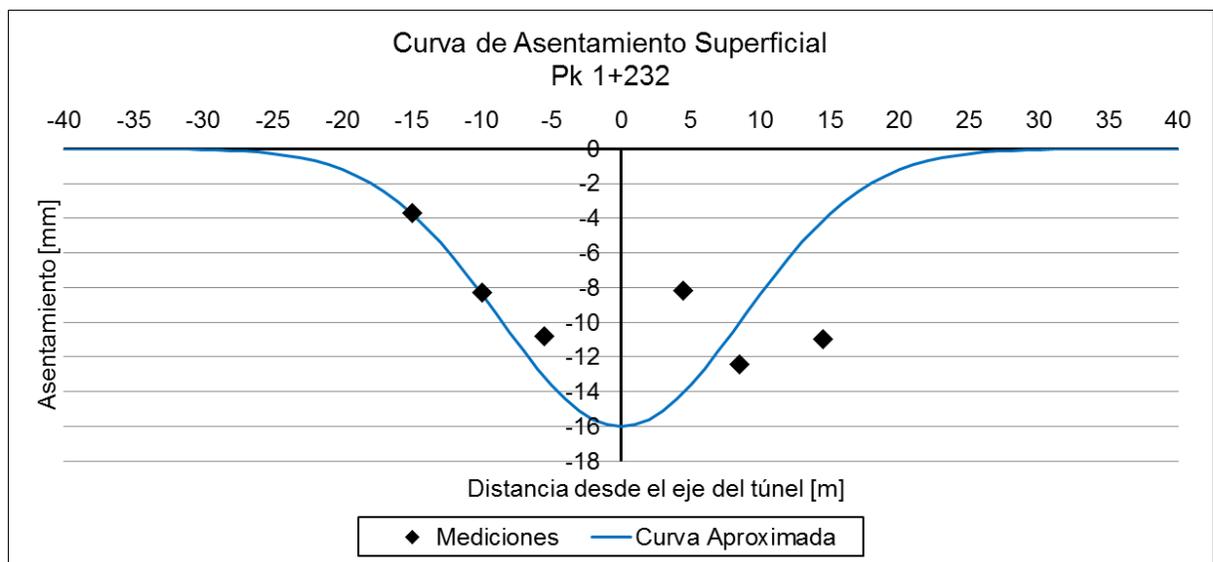


Figura 9-6: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+232

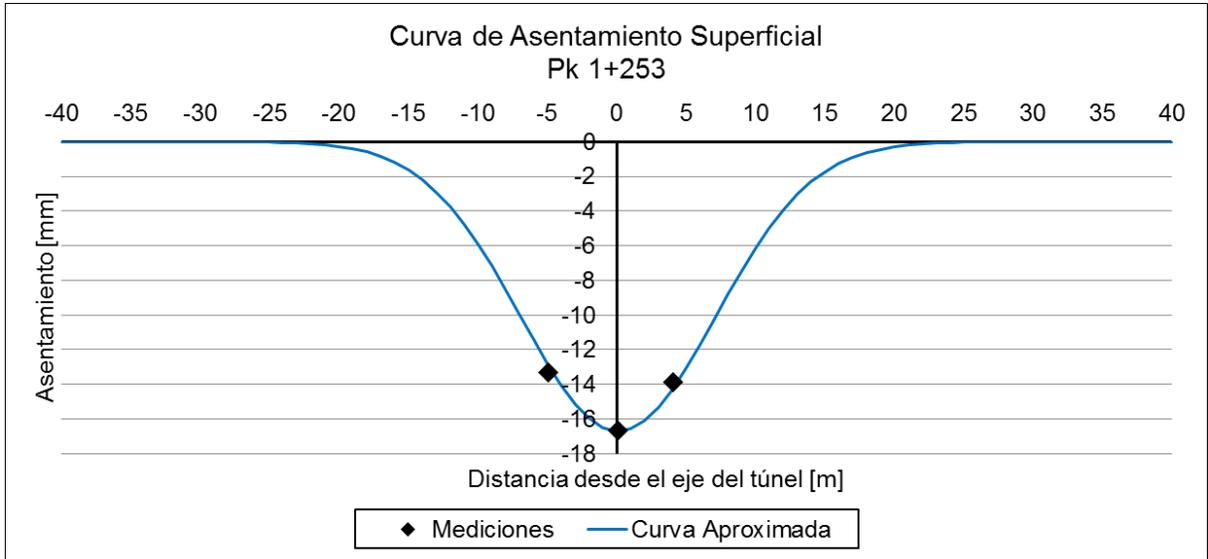


Figura 9-7: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+253

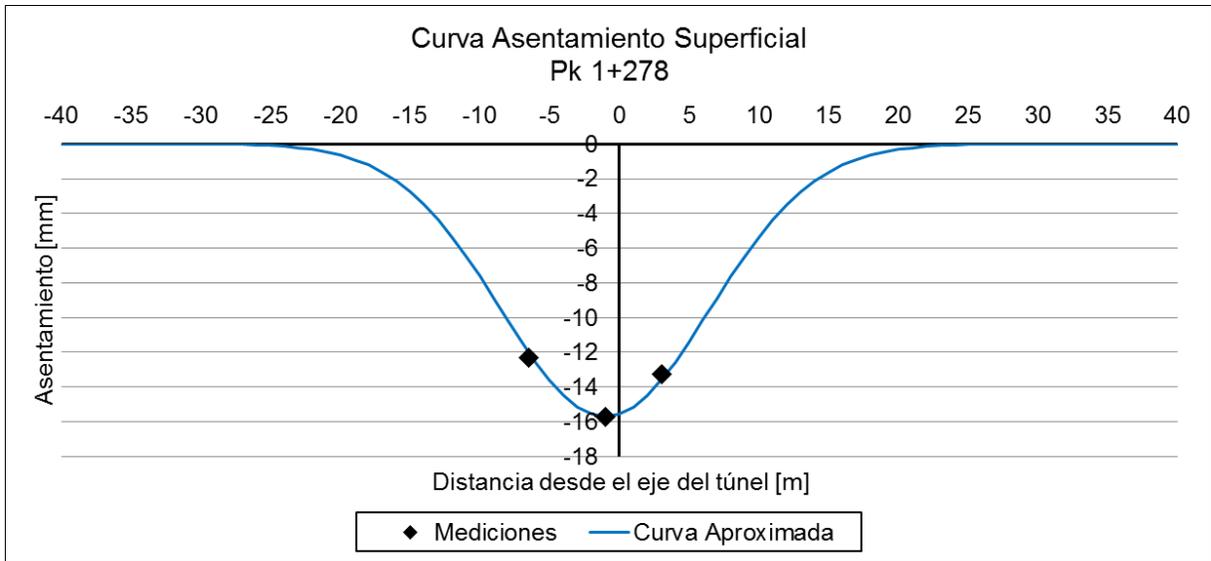
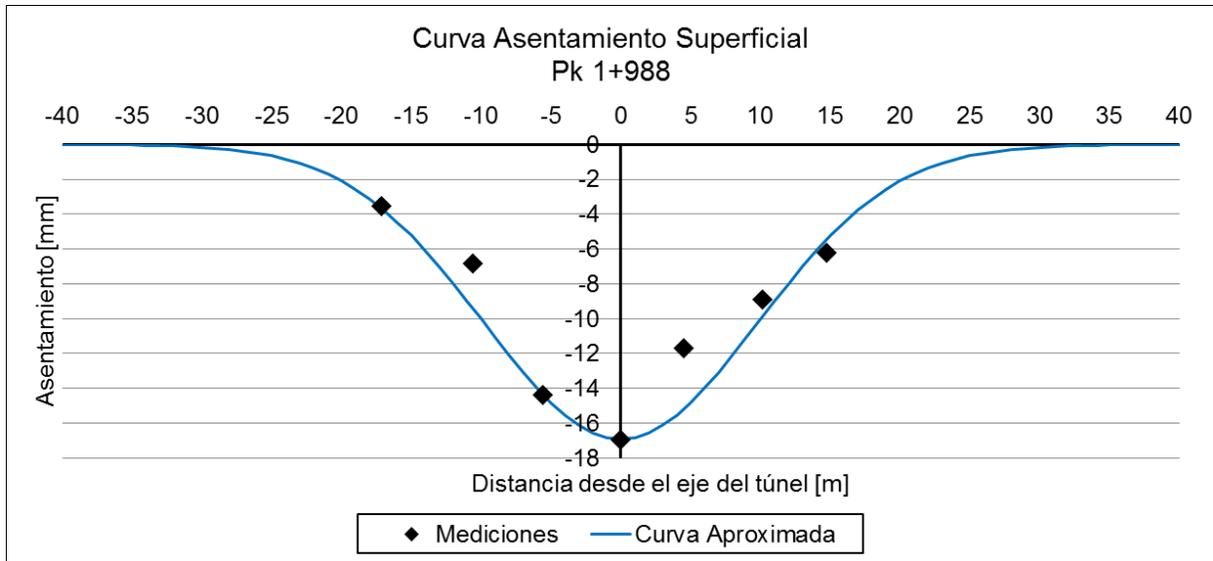
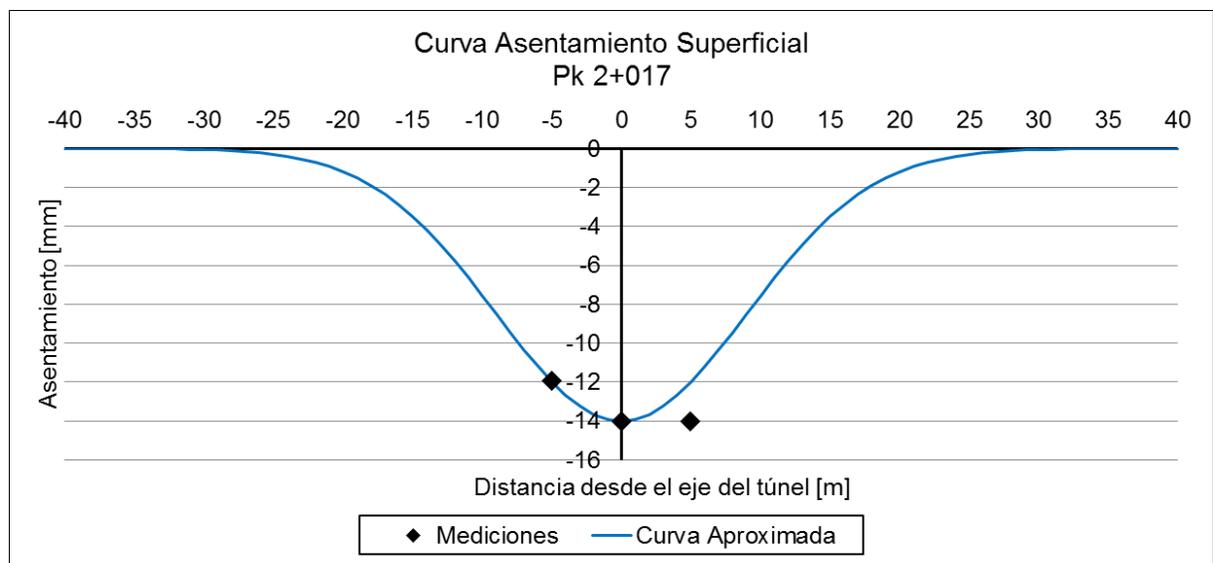


Figura 9-8: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+278



**Figura 9-9: Curva de asentamiento superficial, Pk 1+988**



**Figura 9-10: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+017**

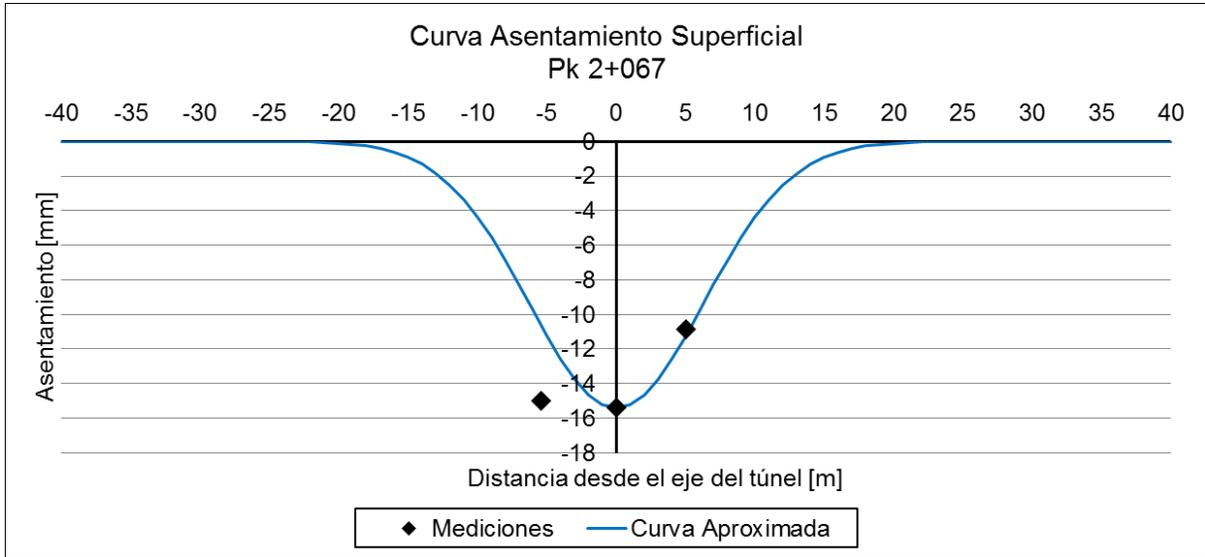


Figura 9-11: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+067

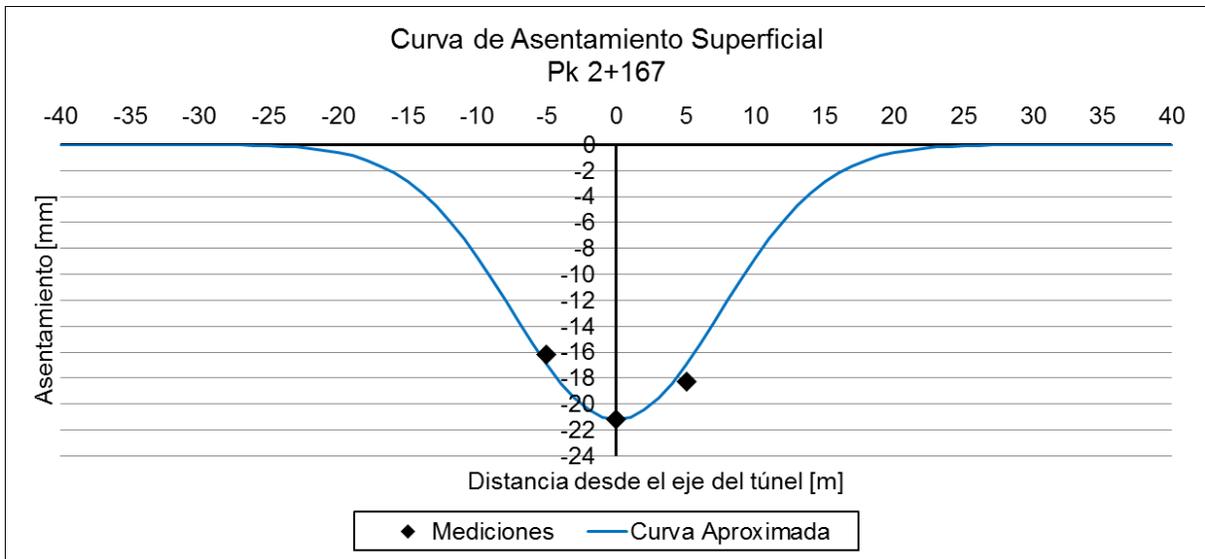


Figura 9-12: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+167

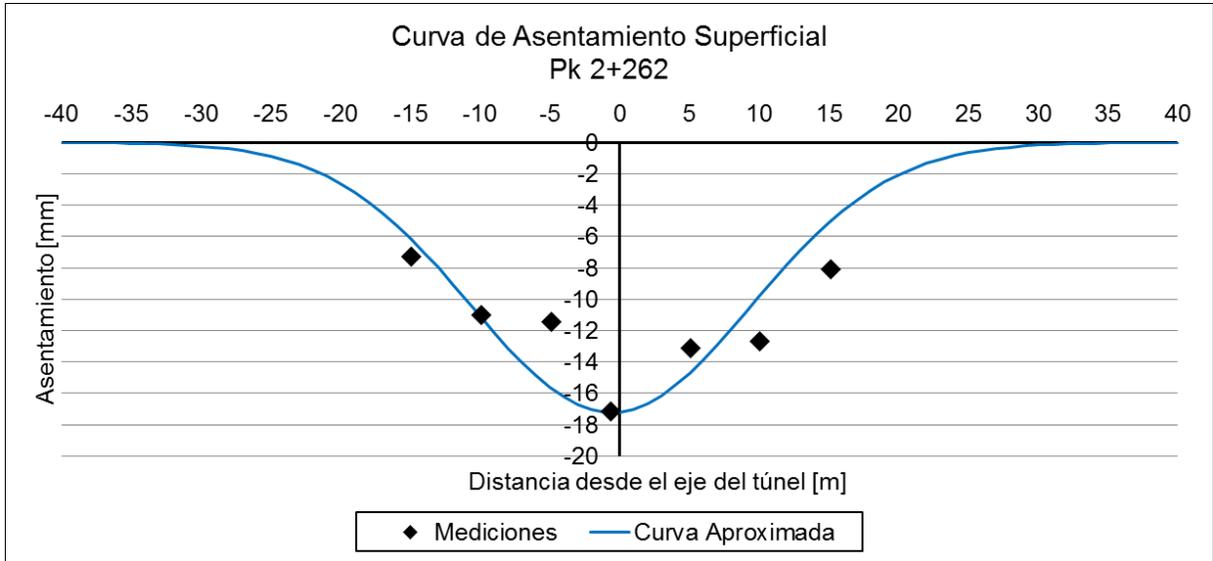


Figura 9-13: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+262

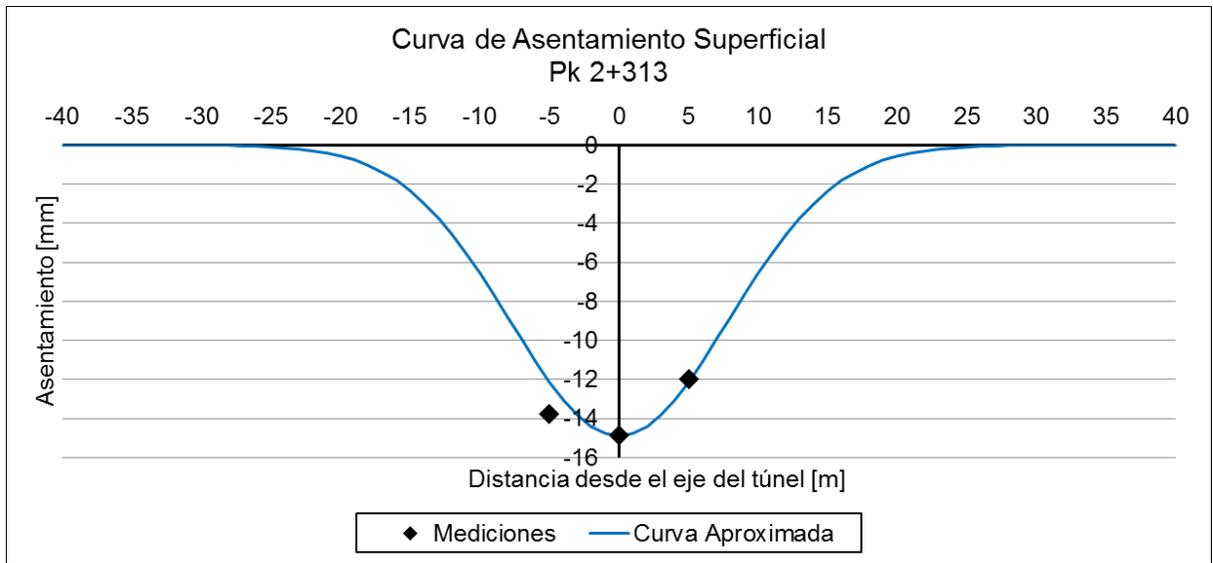


Figura 9-14: Curva de asentamiento superficial, Pk 2+313

## ANEXO E: Variación de la Cohesión y del Ángulo de Fricción

Gráficos no mostrados en el cuerpo, dónde se observan las curvas de asentamiento superficial obtenidas al variar la cohesión y el ángulo de fricción en forma independiente.

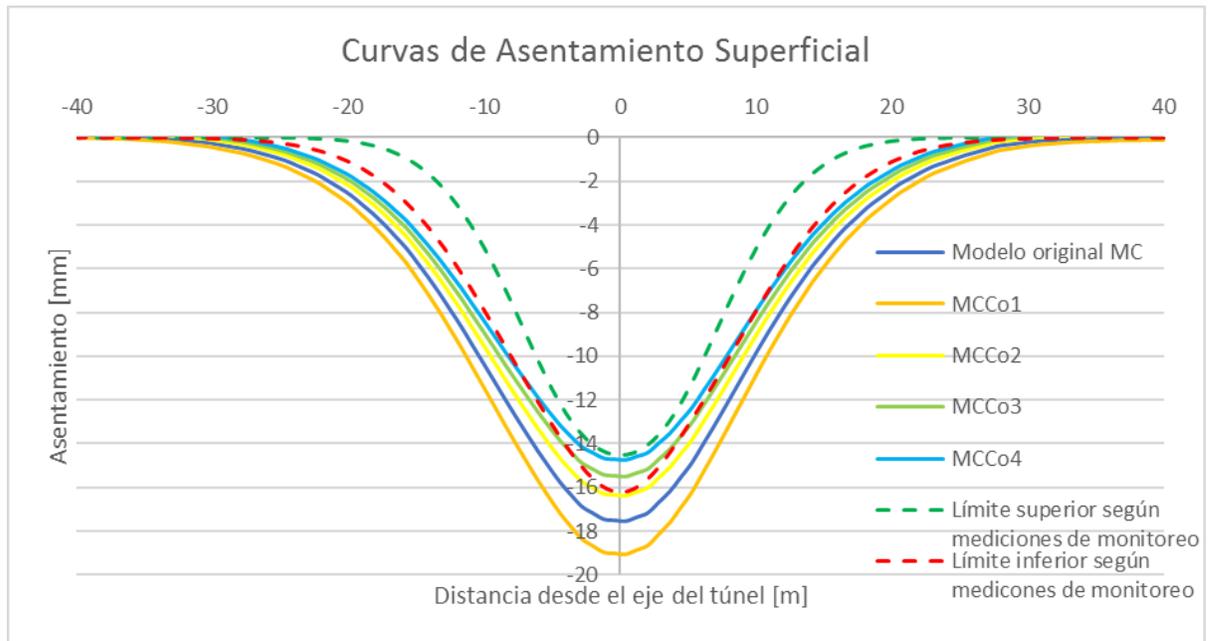


Figura 9-15: Variación de la Cohesión para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A

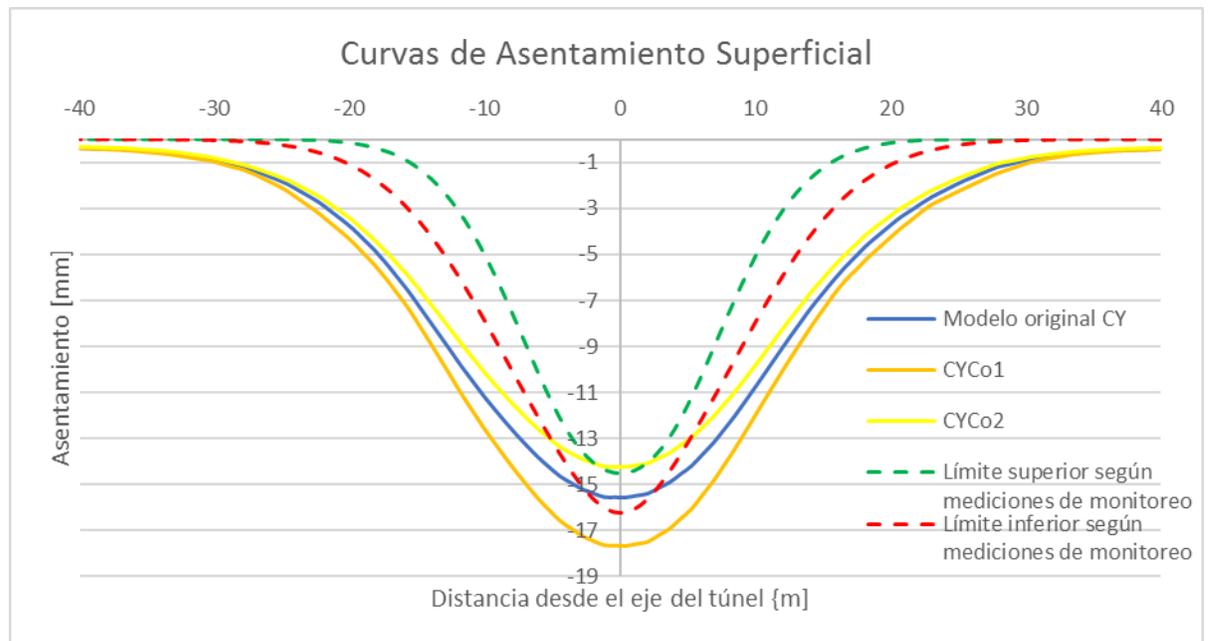


Figura 9-16: Variación de la Cohesión para Cysoil, sección T1C1-A

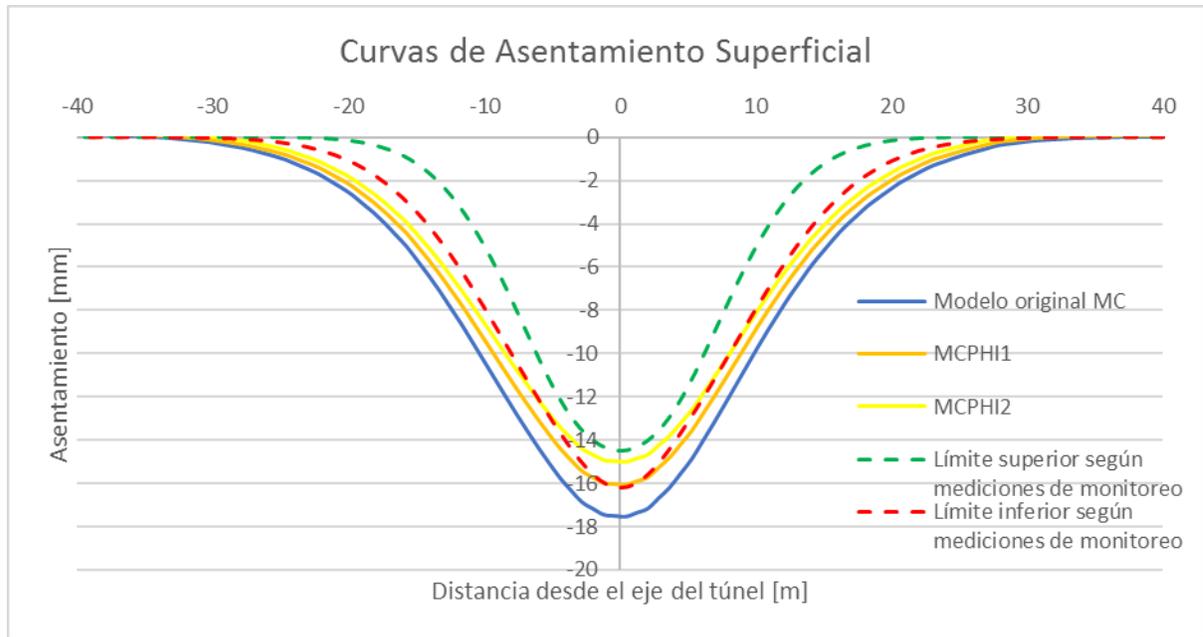


Figura 9-17: Variación del ángulo de fricción para Mohr-Coulomb, sección T1C1-A

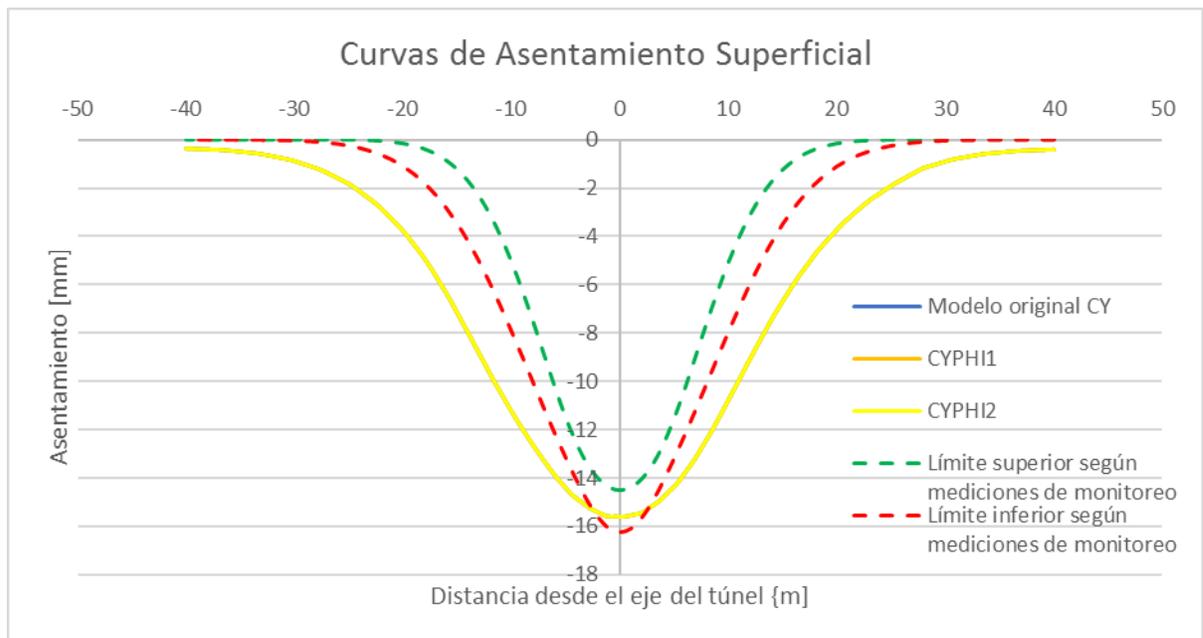


Figura 9-18: Variación del ángulo de fricción para Cysoil, sección T1C1-A