

## Tabla de contenido

Dedicatoria .....	II
Agradecimientos.....	III
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 Desarrollo de la Memoria.....	3
2 Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Métodos de Construcción de Túneles.....	4
2.2.1 Nuevo Método Austriaco para la Construcción de Túneles (NATM).....	6
2.3 Patrones de Deformación del Suelo en torno a la excavación de un Túnel.....	11
2.3.1 Desplazamientos de Convergencia.....	12
2.3.2 Propagación de las Convergencias hacia la Superficie.....	14
2.3.3 Movimientos en Superficie - Subsistencia.....	14
2.4 Instrumentación y Monitoreo de Túneles Urbanos.....	19
2.4.1 Monitoreo Geodésico Subterráneo para la medición de Convergencias.....	21
2.4.2 Monitoreo Geodésico para la medición de Movimientos Superficiales y Sub-superficiales.....	23

2.4.3	Errores en los Sistemas de Medición. ....	25
3	Antecedentes Generales de la Construcción de las nuevas líneas del Metro de Santiago. ....	33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Túneles estudiados. ....	35
3.2.1	Túnel Estación 1. ....	36
3.2.2	Túnel Estación 2. ....	37
3.3	Métodos Constructivos de las Obras Subterráneas. ....	38
3.3.1	Obras Subterráneas a Construir en las Estaciones. ....	38
3.3.2	Concepto del Nuevo Método Constructivo. ....	41
3.3.3	Paraguas de Protección. ....	42
3.3.4	Elementos de Revestimiento. ....	43
3.3.5	Secuencia Constructiva de las Obras Subterráneas. ....	43
3.4	Condiciones del Subsuelo: Caracterización y Perfil Estratigráfico de los Túneles Estudiados. ....	49
3.4.1	Unidades geotécnicas identificadas.....	49
3.4.2	Estratigrafía del Túnel Estación 1. ....	50
3.4.3	Estratigrafía del Túnel Estación 2. ....	51
3.4.4	Riesgos geológico-geotécnicos. ....	52
4	Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico de las Obras Subterráneas en estudio.....	53

4.1.1	Objetivos.....	53
4.1.2	Variables y Dispositivos de Medición.....	54
4.1.3	Plan de Instrumentación y Monitoreo para la Medición de Convergencias.....	54
4.1.4	Plan de Instrumentación y Monitoreo para las mediciones de Subsistencia.....	58
4.1.5	Disposición espacial en planta de los Hitos de Nivelación y Secciones de Convergencia.....	59
4.1.6	Valores Umbrales de Control.....	61
4.1.7	Valores admisibles en Edificaciones y Estructuras.....	63
4.1.8	Almacenamiento y Administración de los Datos de Monitoreo.....	64
4.1.9	Responsabilidades.....	65
5	Resultados Obtenidos por el Monitoreo.....	66
5.1	Monitoreo de Subsistencias.....	66
5.1.1	Evolución de la Subsistencia en el tiempo.....	66
5.1.2	Cubetas Transversales de Subsistencia.....	79
5.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave del Túnel.....	81
5.2.1	Túnel Estación 1.....	81
5.2.2	Túnel Estación 2.....	84
5.2.3	Túnel Interestación.....	87
5.3	Comparación entre los Movimientos Sub-Superficiales del Suelo (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).....	89
6	Discusión y Análisis.....	93

6.1	Monitoreo de Subsidiencias. ....	93
6.1.1	Túneles Estación. ....	93
6.1.2	Túneles Interestación (entre los Túneles Estación 1 y 2). ....	99
6.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave. ....	100
6.3	Fluctuaciones (ruido) en las Curvas. ....	103
6.4	Precisión Teórica de los Sistemas de Medición. ....	104
6.4.1	Monitoreo de Subsidiencias.....	104
6.4.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.....	107
6.5	Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico. ....	111
6.5.1	Dispositivos instalados y Secciones de Monitoreo. ....	111
6.5.2	Características y Requerimientos Generales de Medición. ....	113
6.5.3	Frecuencias de Medición. ....	115
6.5.4	Valores Umbrales de Control. ....	117
7	Propuestas y Recomendaciones. ....	118
7.1	Instrumentación y Monitoreo. ....	118
7.1.1	Subsidencia. ....	118
7.1.2	Convergencia: Descenso de la Clave del Túnel. ....	123
7.2	Propuestas específicas para obras subterráneas similares a las estudiadas. ....	126
7.3	Recomendaciones Generales. ....	128
8	Conclusiones .....	130

Bibliografía .....	133
Anexos .....	I
Anexo A: Fotografías. ....	I

## Índice de figuras

Figura 1: Máquina Tunneladora TBM (Gomes, A. (A) 2014).....	5
Figura 2: Excavación Manual Secuencial en Suelos Granulares, Metro de Santiago Línea 5 (Gomes, A. (A) 2014). ....	5
Figura 3: Secuencia cíclica típica del método NATM (Gacitúa, J. M, 2012).....	7
Figura 4: Secciones típicas para túneles Pequeños, (a) Sección Completa, (b) Sección dividida en Bóveda y Banco (Gacitúa, J. M, 2012).....	8
Figura 5: Secuencia de avance de un túnel pequeño a sección completa (Gomes, A. (A) 2014). ....	8
Figura 6: Sección típica de un Túnel Mediano (Gacitúa, J. M, 2012). ....	8
Figura 7: Secuencia de avance del sistema "Bóveda-Banco-Contrabóveda (Gomes, A. (A) 2014). ....	9
Figura 8: Sección típica de un túnel grande. Los números romanos definen la secuencia típica de excavación para esta configuración (Gacitúa, J. M, 2012). ....	10
Figura 9: "Paraguas". Sistema de soporte anticipado del frente/techo (Gomes, A. 2014).	10
Figura 10: Desarrollo típico de los desplazamientos de Convergencia (ASG, 2014). ....	13
Figura 11: Representación de la subsidencia inducida por la excavación de un túnel (Attewell y Yeates et al 1986).....	15

Figura 12: Cubeta de Subsistencia o de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	16
Figura 13: Método de Peck (1969). Estimación de los asentamientos en superficie mediante la utilización de una Campana de Gauss invertida (Pino. D).....	17
Figura 14: Ley Semi-empírica de distribución de asentamientos superficiales en la dirección longitudinal sobre el eje del túnel (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	18
Figura 15: Definición Semi-Empírica de la cubeta de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	18
Figura 16: Equipos principalmente utilizados en Instrumentación y Monitoreo de Túneles (Rodríguez, J, M. 2008).....	20
Figura 17: Esquema de una sección transversal de un túnel completamente instrumentada (Pérez, E & Álvarez, M, 2010). ....	21
Figura 18: (a) Estación Total Leica TM30, (b) Puntos de control para el monitoreo geodésico de convergencias, (1) diana reflectante BIRREFLEX y (2) prisma de alta precisión (ASG, 2014). ....	22
Figura 19: Esquemas típicos para Secciones de Monitoreo (Invías, 2015).....	23
Figura 20: Ley Especial de Propagación de Errores (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).....	27
Figura 21: Errores típicos del Nivel de Ingeniero. (a) Error de Colimación. (b) Error de Nivelación (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006). ....	29
Figura 22: Esquema de Nivelación Trigonométrica (web).....	30
Figura 23: Errores por No Ortogonalidad de los ejes principales de una Estación Total (Leica Geosystems, 2005).....	31
Figura 24: Red Actual del Metro de Santiago (2015). ....	33

Figura 25: Futura red del Metro de Santiago, con la inclusión de las nuevas Líneas 3 y 6 (Paredes. F). .....	34
Figura 26: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 1 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).....	36
Figura 27: Ubicación en planta del Túnel Estación 1, detalle (Metro. 2013. B). .....	36
Figura 28: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 2 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).....	37
Figura 29: Ubicación en planta del Túnel Estación 2, detalle (Metro. 2013. B). .....	37
Figura 30: Modelo tridimensional de las obras subterráneas a construir en las estaciones (Metro. 2013. G). .....	39
Figura 31: Secciones Transversales de las Obras Subterráneas a construir en las estaciones (propio). .....	39
Figura 32: Perfil Longitudinal de las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A). .....	40
Figura 33: Método de las galerías laterales (Metro.2013. B).....	41
Figura 35: Aplicación del Método de la Bóveda Auto-Portante a la Construcción del Túnel Estación Valledor (Metro.2013. A).....	42
Figura 36: Paraguas a Construir en las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro.2013. A). .....	42
Figura 37: Proceso Constructivo de la Bóveda de la Galería Principal y del Túnel Estación - Secciones (Metro. 2013. A). .....	45
Figura 38: Esquema de Secciones con Banco excavado de la Galería Principal (Metro. 2013. A). .....	46
Figura 39: Sección Transversal del Túnel Interestación (Metro. 2013. A). .....	47

Figura 41: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A).....	51
Figura 42: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 2 (Metro. 2013. B).....	52
Figura 43: Cinta Extensométrica de invar (web).....	56
Figura 44: Secciones de Convergencia de los túneles Estación (izquierda) e Interestación (derecha) (Metro. 2013. D).....	57
Figura 45: Precisiones Instrumentales del Nivel Electrónico Leica DNA 10 (Leica). ....	59
Figura 46: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsistencia. Túnel Estación 1.....	60
Figura 47: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsistencia. Túnel Estación 2.....	60
Figura 48: Disposición Espacial de las Secciones de Monitoreo. Túnel Interestación (elaboración propia). ....	61
Figura 49: Resultados del Monitoreo de Subsistencia. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Secciones 1962 y 1964 (Galería Secundaria). ....	67
Figura 50: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Sección 1981. ....	70
Figura 51: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Galería Principal. Sección GP2 (18m). ....	73
Figura 52: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Poniente. Sección 3450. ....	74
Figura 53: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Oriente. Secciones 3545 y 3550. ....	76
Figura 54: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Interestación. ....	77

Figura 55: Resultaos obtenidos por el Monitoreo de Subsidiencias. Cubetas Transversales.....	79
Figura 56: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.....	81
Figura 57: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.....	82
Figura 58: Vista ampliada de la Sección 2041.....	82
Figura 59: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.....	84
Figura 60: Vista ampliada de la Sección 3530.....	84
Figura 61: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.....	85
Figura 62: Vista ampliada de la Sección 3545.....	85
Figura 63: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave. Túnel Interestación.....	87
Figura 64: Gráficos de comparación entre el monitoreo Sub-superficial (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).....	89
Figura 65: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 1946. Porcentaje de desplazamiento en la fase de bóveda.....	97
Figura 66: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 24 GP, Túnel Estación 2. Porcentajes de desplazamiento en la fase de bóveda.....	97
Figura 67: Segmentos escogidos para el cálculo empírico de la precisión del Sistema de Medición de Subsidiencias.....	106
Figura 68: Esquema Nivelación Trigonométrica.....	107

Figura 69: Magnitudes de las oscilaciones presentes en las curvas del descenso de la clave.....	110
Figura 70: Resultado del Monitoreo del Descenso de la Clave. T. Estación 2. Sección 3545. ....	110
Figura 71: Comparación entre las Frecuencias ejecutadas y propuestas en las Curvas de Subsistencia. Sección 1981. Túnel Estación 1.....	115
Figura 72: Esquema de áreas con distintas frecuencias para un túnel superficial; arriba vista en perfil longitudinal y abajo vista en planta (ASG, 2014).....	120
Figura 73: Diferenciación espacial de los rangos de monitoreo relacionado a las distintas fases constructivas y Frecuencias mínimas típicas para los respectivos rangos de monitoreo (modificación de ASG, 2014).....	121
Figura 74: Esquema Transversal preliminar típico para el posicionamiento de Hitos de Nivelación (ITA, 2011).....	122
Figura 75: Esquema de medición para el método de Estación Libre interconectada (ASG, 2014). ....	125
Figura 76: Esquema de Interconexión Asimétrico (ASG, 2014). ....	125
Figura 77: Construcción del Pique e Inicio de la Bóveda de la Galería Principal. (Velazco, Eduardo).....	I
Figura 78: Revestimiento Primario (izquierda) y Secundario (derecha) de la GP (Velazco, Eduardo).....	I
Figura 79: Entronque con el Túnel Estación (Velazco, Eduardo).....	II
Figura 80: Avance en Fases del Túnel Estación (Velazco, Eduardo).....	II
Figura 81: Excavación de los Banco de las Obras Subterráneas (Velazco, Eduardo)....	II

Figura 82: Construcción en retirada de la Contra-Bóveda de la Galería Principal (Velazco, Eduardo).....III

Figura 83: Monitoreo superficial mediante Hitos de Nivelación Superficial (HNS) y Profunda (HNP) (elaboración propia). .....III

Figura 84: Monitoreo subterráneo tridimensional de desplazamientos absolutas, para la mediciones de Convergencias, (1) Estación Total Leica TM30 y (2) Punto de Control Óptico PCO (elaboración propia). ..... IV

### **Índice de Cuadros.**

Cuadro 2: Organización jerárquica de las entidades presentes en el proyecto de Construcción y Monitoreo de las Obras Subterráneas estudiadas (elaboración propia).35

Cuadro 5: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Convergencia (Metro. 2013. C). .....56

Cuadro 6: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Subsistencia (Metro. 2013. C). .....59

Cuadro 7: Valores Umbrales de Control de las Obras Subterráneas (Contacto SDO)...62

Cuadro 8: Niveles de Alerta y actuaciones previstas (Metro.2013.C). .....62

Cuadro 9: Valores admisibles de Asentamientos y Distorsiones Angulares (Metro. 2013. E).....63

Cuadro 10: Cuadro de responsabilidades del Proyecto de Instrumentación y Monitoreo (elaboración propia). .....65