

Tabla de contenido

1.	Introducción y organización de la memoria.....	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Organización de la memoria.....	2
2.	Motivación, Objetivos y Alcance	3
2.1.	Motivación	3
2.2.	Objetivos	3
2.3.	Alcance.....	4
3.	Metodología	5
4.	Estado del conocimiento	6
4.1.	Generalidades	6
4.2.	Cargas en las vías	6
4.2.1.	Cargas Cuasi – Estáticas.....	6
4.2.2.	Cargas dinámicas.....	7
4.2.3.	Cargas Longitudinales	9
4.3.	Propagación de las ondas en el terreno	9
4.3.1.	Ondas sísmicas en medio elástico y continuo	9
4.3.2.	Propagación de ondas en semi – espacios elásticos	14
4.3.3.	Atenuación de las ondas con la distancia.....	18
4.3.4.	Ondas en un medio estratificado.....	18
4.4.	Normas de vibraciones y Ruido.....	19
4.4.1.	Introducción.....	19
4.4.2.	Normas de aceptación de ruido.....	19
4.5.	Medidas de Mitigación de vibraciones	24
4.5.1.	Métodos <i>Activos</i>	24
4.5.2.	Métodos <i>Pasivos</i>	25
4.5.3.	Métodos en la trayectoria de las ondas	25
5.	Antecedentes	29
5.1.	Introducción	29
5.2.	Tramo por estudiar de la Línea 3	30
5.3.	Propiedades y geometría del túnel.....	32
5.4.	Estratigrafía del lugar	35
5.4.1.	Propiedades Geotécnicas	35

5.4.	Antecedentes de los Trenes	37
5.4.1.	Composición del tren.....	37
5.4.2.	Propiedades de la rueda	39
5.5.	Antecedentes de la vía	39
5.5.1.	Riel	39
6.	Modelo de estudio	42
6.1.	Modelo dinámico del tren.....	42
6.1.1.	Frecuencias Naturales.....	44
6.1.2.	Amortiguamiento modal.....	44
6.1.3.	Cargas basales	46
6.1.4.	Respuesta de desplazamientos y carga transmitida	49
6.1.5.	Carga en el espacio del tiempo	50
6.1.6.	Carga en el espacio de las Frecuencias	54
6.2.	Modelo Flac3D.....	59
6.2.1.	Efecto del amortiguamiento.....	63
6.2.2.	Efecto del tamaño de los elementos finitos.....	74
7.	Resultados obtenidos.....	80
7.1.	Respuesta en superficie	82
7.1.1.	Comparación del Desplazamiento	82
7.1.2.	Comparación de la Velocidad.....	84
7.1.3.	Comparación de la Aceleración	87
7.2.	Límites de la norma.....	90
7.3.	Túnel Herradura	91
7.3.1.	Comparación Desplazamiento	92
7.3.2.	Comparación de la Velocidad.....	94
7.3.3.	Comparación de la Aceleración	96
5.6.	Límites de la norma	99
8.	Conclusiones	100
9.	Bibliografía	104
10.	Anexo A	106

Índice de figuras

Figura 2. 1	Vibración superficial debido al tráfico de trenes subterráneos. (Montalvo, 2007).....	3
Figura 4. 1	Esquema modelo ferroviario sencillo. (Esveld, 2001).....	7

Figura 4. 2 Fuerzas acutantes en un cuerpo infinitesimal de tamaño $dx, dy dz$	10
Figura 4. 3 Ondas de cuerpo en un medio elástico. Fuente (Montalvo, 2007)	11
Figura 4. 4 Variación en la relación de velocidades de compresión y corte en función del módulo de Possion. (Braja & Ramana, 2011)	12
Figura 4. 5 Comparación de resultados teóricos y experimentales de la velocidad de onda compresiva de cuerpo en suelos secos y saturados en arena Ottawa (Braja & Ramana, 2011).....	13
Figura 4. 6 Variación de la velocidad de onda de corte en Arena Ottawa, en función de la presión de confinamiento.....	13
Figura 4. 7 Esquema de la deformaciones producidas en superficie por onda Rayleigh. (Maldonado, s.f.)	15
Figura 4. 8 Variación de la velocidad de onda Rayleigh y de cuerpo según el módulo de Poisson (Kramer, 1996).....	15
Figura 4. 9 Variacion de la amplitud de movimiento en función de la profundidad, del índice de vacíos y longitud de onda λr . (Kramer, 1996)	16
Figura 4. 10 Esquema de la deformaciones producidas en superficie por onda Love. (Maldonado, s.f.)	16
Figura 4. 11 Variación del desplazamiento “v” de la partícula en función de la profundidad (H) (Kramer, 1996).....	17
Figura 4. 12 Variacion de la velocidad de onda Love (v_s) segun la frecuencia(ω). (Kramer, 1996).	17
Figura 4. 13 Nivel de desplazamiento en funcion de la frecuencia y su clasificación (Wiss & Parmelee, 1974).	21
Figura 4. 14 Aceleración peak en funcion de la frecuencia y su clasificacion (Gierke & Goldman, 1976).....	22
Figura 4. 15 Esquema de losa Flotante (Carman, 2012).....	25
Figura 4. 16 Estudio experimental de aislamiento pasivo mediante zanjas abiertas (Woods, Richart, & Hall, 1970).	26
Figura 4. 17 Estudio experimental realizado por Wood (1969).....	27
Figura 4. 18 Aceleraciones verticales maximas en el suelo. Sin bloque enterrado.	27
Figura 4. 19 Aceleracion Vertical máxima. Bloque enterrado 1 metro.....	28
Figura 5. 1 Plano de Red de Metro de Santiago. (Metro, 2019)	29
Figura 5. 2 Nuevas Líneas de Metro de Santiago L3 y L6. (Layera, 2018)	30
Figura 5. 3 Ubicación del tramo a estudiar. a) Vista más amplia, tramo de interés en amarillo, ruta 5, Vespucio Norte (ruta 70) y Estación "Los Libertadores" (punto blanco) y en b) zoom hacia la tramo de interés, ubicado entre calle Las parcelas y Cuatro Oriente.....	31
Figura 5. 4 Geometría del tunel a estudiar. (ARCADIS, 2013)	32
Figura 5. 5 Geometría del túnel, donde se muestran las estructuras de las vías, la manta elastomérica, los trenes, se muestran los rines, trenes y los pantógrafos.	33
Figura 5. 6 Suelos de Santiago. (Valenzuela, 1978)	35
Figura 5. 7 Curva de asentamientos medidas en superficie (línea punteada) y curva modelada (línea continua). Deformaciones en [mm].	36
Figura 5. 8 Composición del Tren de las nuevas líneas 3 y 6 de Metro de Santiago. (CAF, 2015) ..	37
Figura 5. 9 Modelo simplificado de riel UIC60. Dimensiones en mm.	40

Figura 6. 1 Modelo simplificado de tren-vía. (Melis, 2002).	42
Figura 6. 2 Modelo Plano de Carro + bogí +ruedas y eje, suspensión primaria y secundaria para modelo analítico de carga dinámica. (CAF, INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO, 2015)	43
Figura 6. 3 Nivel de Rugosidad de las vías para distintas longitudes de onda. (3590, 2005)	47
Figura 6. 4 Frecuencia de Carga vs Longitud de Onda para distintas velocidades. (Escalas Logaritmicas).	48
Figura 6. 5 Aceleración basal para distintas velocidades y longitudes de onda, obtenidas mediante la fórmula 6.2	49
Figura 6. 6 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 30 [Km/h].	51
Figura 6. 7 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 40 [Km/h].	52
Figura 6. 8 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 50 [Km/h].	52
Figura 6. 9 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 60 [Km/h].	53
Figura 6. 10 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 70 [Km/h].	53
Figura 6. 11 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 80 [Km/h].	54
Figura 6. 12 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 30 [Km/h].	55
Figura 6. 13 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 40 [Km/h].	55
Figura 6. 14 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 50 [Km/h].	56
Figura 6. 15 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 60 [Km/h].	56
Figura 6. 16 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 70 [Km/h].	57
Figura 6. 17 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 80 [Km/h].	57
Figura 6. 18 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para el carro completo en condicion AW0 (arriba) y en condicion AW4 (abajo) para una velocidad de circulación igual a 80 [Km/h].	58
Figura 6. 19 Modelo de estudio, Phase 2.	60
Figura 6. 20 Historial de registros tanto en las cercanias del túnel como en superficie, además del punto de aplicación de la carga. Modelo sacado de FLAC3D.	64
Figura 6. 21 Comparación del desplazamiento, velocidad y aceleración vertical en la línea central del túnel en la Superficie Libre.	66
Figura 6. 22 Comparación del desplazamiento, velocidad y aceleracion vertical en puntos superficiales alejados de la línea central del túnel.	67
Figura 6. 23 Efecto de la distancia en el desplazamiento, la velocidad y aceleracion verticales en la superficie libre para el modelo de 2% de amortiguamiento.	68
Figura 6. 24 Distribución de la aceleración vertical en el modelo de estudio. Unidades en [m/s ²]	69

Figura 6. 25 Variación del desplazamiento máximo en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento.....	70
Figura 6. 26 Variación de la velocidad máxima en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento	70
Figura 6. 27 Variación de la aceleración máxima en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento.....	71
Figura 6. 28 Transformada de fourier de la aceleracion vertical en la superficie libre.	72
Figura 6. 29 Zona de estudio de (Acevedo Plaza, 2020) y lugar de estudio de esta memoria (Rojo).	73
Figura 6. 30 Frecuencia natural del suelo de Quilicura, (Acevedo Plaza, 2020), Zona de estudio 3.	73
Figura 6. 31 Mallado de modelo Fino, Tamaño máximo 1.3 m.....	74
Figura 6. 32 Señales filtradas a 25 Hz y 63 Hz.....	75
Figura 6. 33 Señales en el espacio de las frecuencias	75
Figura 6. 34 Comparación de desplazamiento de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.	76
Figura 6. 35 Comparación de velocidad de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.....	76
Figura 6. 36 Comparación de aceleración de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.....	77
Figura 6. 37 Comparación de desplazamiento de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Direccion horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z.....	77
Figura 6. 38 Comparación de velocidad de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Direccion horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z.....	78
Figura 6. 39 Comparación de aceleración de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Direccion horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z.....	78
Figura 6. 40 Transformada de Fourier de la señal obtenida para mallado fino y grueso de la aceleración vertical en superficie libre.	79
Figura 7. 1 Modelo para estudio del efecto de elastómero bajo losa	81
Figura 7. 2 Detalle modelo	81
Figura 7. 3 Modelo de losa Flotante	82
Figura 7. 4 Historial de registros tanto en las cercanías del túnel como en superficie, además del punto de aplicación de la carga. Modelo sacado de FLAC3D	82
Figura 7. 5 Comparación desplazamiento vertical en superficie Lc del sistema base y con losa flotante	83
Figura 7. 6 Comparación desplazamiento vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.	84
Figura 7. 7 Variación porcentual entre desplazamiento máximo en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de Losa Flotante y sistema Base.	84
Figura 7. 8 Comparación velocidad vertical en superficie Lc del sistema base y con losa flotante ..	85
Figura 7. 9 Comparación velocidad vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.	86
Figura 7. 10 Transformada de Fourier de la Velocidad Vertical en los distintos puntos de control superficiales.	86

Figura 7. 11 Variación porcentual entre velocidad máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de Losa Flotante y sistema Base.	87
Figura 7. 12 Comparación aceleración vertical en superficie Lc del sistema base y sistema losa flotante.	88
Figura 7. 13 Comparación aceleración vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.	88
Figura 7. 14 Transformada de Fourier de la señal de Aceleración Vertical en los distintos puntos de control superficiales.	89
Figura 7. 15 Variación porcentual entre Aceleración máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de Losa Flotante y sistema Base.	89
Figura 7. 16 Niveles de vibracion en superficie. Velocidad de referencia $1 \cdot 10^{-6}$ in/s. Rango de frecuencias mostrado 4 – 25 Hz. Comparación entre Sistema Base y Sistema con Losa Flotante.	90
Figura 7. 17 Túnel tipo Herradura. Modelo FLAC 3D.	92
Figura 7. 18 Desplazamiento vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	93
Figura 7. 19 Desplazamiento vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	93
Figura 7. 20 Variación porcentual entre Desplazamiento máximo en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Tunel tipo Herradura y Túnel con Contrabóveda.	94
Figura 7. 21 Velocidad vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	95
Figura 7. 22 Velocidad vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	95
Figura 7. 23 Transformada de Fourier de la Velocidad Vertical en los distintos puntos de control superficiales. Comparación Túnel con Contrabóveda y Túnel tipo Herradura.	96
Figura 7. 24 Razón entre Velocidad máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Tunel tipo Herradura y Túnel con Contrabóveda.	96
Figura 7. 25 Aceleración vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	97
Figura 7. 26 Aceleración vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.	98
Figura 7. 27 Transformada de Fourier de la Aceleración Vertical en los distintos puntos de control superficiales. Comparación Túnel con contrabóveda y Túnel tipo Herradura.	98
Figura 7. 28 Razón entre Aceleración máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Tunel tipo Herradura y Túnel con Contrabóveda.	99
Figura 7. 29 Niveles de vibracion en superficie. Velocidad de referencia $1 \cdot 10^{-6}$ in/s. Rango de frecuencias mostrado 4 – 25 Hz. Comparación entre Túnel con Contrabóveda y Túnel tipo Herradura.	100

Índice de tablas

Tabla 4. 1 Influencia del Radio de Impedancia en la amplitud de desplazamientos y tensiones de las ondas reflejadas y transmitidas.	19
Tabla 4. 2 Clasificación de las vibraciones y su nivel de percepción para las personas (Bachmann & Ammann, 1987).	21
Tabla 4. 3 Valores de KB para edificaciones residenciales (German Institute of Standards, 1999).	23

Tabla 4. 4 Respuesta humana frente a diferentes niveles de vibración y ruido generadas en Terreno (FTA, 2006)	23
Tabla 4. 5 Ground-Borne Vibration (GBV) y Ground-Borne Noise (GBN) y criterios de impactos (FTA, 2006).	24
Tabla 5. 1 Antecedentes Líneas de metro de Santiago. (Wikipedia, 2019)	30
Tabla 5. 2 Propiedades Geométricas del Túnel a estudiar. (ARCADIS, 2013).....	32
Tabla 5. 3 Coordenadas de los puntos geométricos de secciones de túnel. (ARCADIS, 2013)	33
Tabla 5. 4 Propiedades Mecánicas del hormigón estructural. (Layera, 2018).....	34
Tabla 5. 5 Propiedades mecánicas del acero de las mallas electrosoldadas. (Layera, 2018).....	34
Tabla 5. 6 Propiedades Geométricas de elementos subestructuras de la vía. (ARCADIS, 2013)	34
Tabla 5. 7 Parámetros geotécnicos del tramo de estudio.	36
Tabla 5. 8 Peso de la caja de los carros sin equipos. Unidades en [kg] (CAF, 2015)	37
Tabla 5. 9 Peso de los equipos de los carros. Unidades en [kg] (CAF, 2015).....	37
Tabla 5. 10 Peso de los bogíes de los carros. Unidades en [kg] (CAF, 2015).....	38
Tabla 5. 11 Peso de los Carros completos en diferentes condiciones de carga. Unidades en [kg]. (CAF, 2015).	38
Tabla 5. 12 Dimensiones de las cajas de los Carros Tren Línea 3 y 6 del Metro de Santiago. (CAF, INTERFACE MATERIAL RODANTE CON OBRAS CIVILES (P63-IB-0004-ESF-000-MB-0002), 2012).....	38
Tabla 5. 13 Suspensión primaria y secundaria de los carros y contacto Hertziano	38
Tabla 5. 14 Características de la rueda de los trenes de la línea 3 y 6. (ArcelorMittal, s.f.).....	39
Tabla 5. 15 Información del riel en Línea 3 y 6. (ArcelorMittal, s.f.).....	39
Tabla 5. 16 Dimensiones, área e inercia del Riel UIC-60.....	40
Tabla 5. 17 Dimensiones de Sección equivalente a Riel UIC-60. Dimensiones en [mm].....	41
Tabla 6. 1 Frecuencias Naturales de los carros para condiciones de carga Tara (AW0) y lleno (AW4). Unidades en [Hz].	44
Tabla 6. 2 Amortiguamiento en % para distintas condiciones de carga.	45
Tabla 6. 3 Amortiguamiento de cada modo de los carros y para distintas condiciones de carga. Los valores estan en [%].	45
Tabla 6. 4 Componente predominante según modo, tipo de carro y condición de carga	46
Tabla 6. 5 Frecuencias de carga de fuerza de contacto. Unidades en Hz	59
Tabla 6. 6 Frecuencia de la onda de carga, longitud de onda asociada y tamaño máximo del elemento para el modelado.....	61
Tabla 6. 7 Resumen de las propiedades del perfil de Quilicura. Modificado de (Godoy, González, & Sáez, 2015).....	61
Tabla 6. 8 Modelos de estudio de influencia del tamaño del elemento y amortiguamiento.	61
Tabla 6. 9 Tiempo de cálculo de los ditintos modelos.....	62
Tabla 6. 10 Frecuencias predominantes de la respuesta en superficie libre.	72
Tabla 7. 1 Tabla resumen de la variación porcentual de los valores máximos comparados para ambos modelos. Números negativos representan disminución, mientras que los positivos representan aumento. Comparación sistema de Losa Flotante y Sistema Base.....	90

Tabla 7. 2 Tabla resumen de la variación porcentual de los valores máximos comparados para ambos modelos. Números negativos representan disminución, mientras que los positivos representan aumento. Comparación Túnel Herradura y Túnel con contrabóveda.99