



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

ESTUDIO DE VIBRACIONES CAUSADAS POR LA CIRCULACIÓN DE TRENES EN LOS TÚNELES DE METRO DE LA LÍNEA 3 Y PROPUESTA DE SISTEMA DE CONTROL DE VIBRACIONES

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
NICOLÁS ALONSO BRAVO VÁSQUEZ**

**PROFESOR GUÍA:
JUAN CARLOS POZO ROJAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF
ROBERTO GESCHE SCHULER**

SANTIAGO DE CHILE

2020

ESTUDIO DE VIBRACIONES PROVOCADAS POR EL TRÁNSITO DE TRENES EN LOS TÚNELES DE METRO DE LA LÍNEA 3 Y PROPUESTA DE SISTEMA DE CONTROL

El crecimiento constante de Santiago y el aumento demográfico conlleva a una necesidad constante de mejorar la calidad de vida de las personas. Con el fin de ayudar a la calidad de vida, se requiere constantemente mejoras en los sistemas de transporte que existen en Santiago. Como consecuencia de esto se han ampliado tanto el sistema de Metro como también las tecnologías existentes de los trenes, estaciones y líneas en general. Estos cambios han llevado a mejoras sustanciales del sistema, pero también han traído consigo problemas que antes no existían, como lo son las vibraciones provocadas por los nuevos trenes. Esto se debe a que los nuevos trenes, de conducción a distancia (sin conductor), poseen ruedas de acero en vez de ruedas neumáticas como los trenes antiguos, implicando cargas que antes no existían. Esto motiva a la realización de este estudio.

El presente trabajo es una investigación en el que se analizan las vibraciones provocadas por el tránsito de trenes en los túneles de la Extensión de la línea 3 del Metro de Santiago. Esta se ubica en la comuna de Quilicura en el sector Norponiente de la ciudad capital de Chile. En particular el sector de estudio corresponde a la Avenida Matta, una de las calles principales de circulación de esta comuna y sus alrededores, la que es de carácter residencial y comercial. Se desea determinar si las vibraciones superficiales generadas por la carga impuesta traerán problemas en la ciudadanía y en especial si afectará en su calidad de vida.

Para ello se lleva a cabo una recopilación de medidas de control de estas vibraciones y se determina aquellas que sean factibles de construir en las líneas de Metro. Paralelamente se estudia la forma de generar una carga representativa de un tren circulando en las vías, la cual fue obtenida mediante el uso del programa Matlab. Para efectos de la modelación se ha considerado que las cargas impuestas en las vías son solo de carácter vertical y se aplican en un tramo de túnel recto.

Una vez obtenida la carga equivalente de un tren en el tiempo, se realiza un modelamiento del túnel en que transitarán los trenes. El modelamiento se lleva a cabo mediante la herramienta FLAC3D. La secuencia constructiva del túnel es simulada previamente al análisis dinámico siguiendo la metodología utilizada por Sofia Layera en su trabajo de título (Layera, 2018). Luego, se estudia un modelo simplificado de 1 metro de longitud para calibrar los parámetros dinámicos. Se hace un modelamiento con leyes constitutivas elastoplásticas Mohr Coulomb, la cual se comprueba que es una buena aproximación para el nivel de deformaciones obtenidas.

En este trabajo preliminar se asume deformaciones planas del suelo ya que se modelan solo cargas verticales. Para conseguir simulaciones computacionales más realistas de las vibraciones obtenidas tanto en superficie como en elementos estructurales es necesario tener mediciones de las vibraciones en lugares determinados para poder calibrar de mejor manera los parámetros y modelos dinámicos y luego se puedan extender a distintos sectores de estudio. Cabe mencionar que este estudio es una aproximación teórica, ya que no se contaba con las mediciones reales de vibraciones y todas fueron simuladas siguiendo metodologías anteriormente estudiadas. Dentro de los resultados obtenidos en este trabajo se comprueba que un sistema del tipo *Losa Flotante* funciona bien como aislante de vibraciones, además de que los túneles con *Contrabóveda* presentan menos niveles de vibraciones que los del tipo *Herradura*.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a mi familia, a mis padres Cecilia y Eduardo por todo el apoyo incondicional que me han dado, por estar siempre para mí y tener la mejor disposición. A mi hermana Loreto por siempre apoyarme y sacarme una sonrisa cuando lo necesitaba. Y a mi Weli por todo el regaloneo que me ha dado. No me puedo olvidar de mi polola, Carito, gracias por el apoyo, el cariño y el amor que me has entregado y las risas que han sido muchaaaaas. Infinitas gracias por todo, por lo que me has entregado y apoyado. Te amo mucho.

También quiero agradecer a mis amigos, mi segunda familia, que siempre han estado ahí para mí, para lo que los necesité. Dopa, a Pato, a la Taylor Gang (<3), a mis amigos de la u, al Toro, Karim, Tavo, Diego, Pablo, Cañete, Dani, Marce, Chung, Manqueque, Robeeerto y los Civolatiles. Gracias por las risas, los buenos momentos, el estudio y la ayuda que me han brindado, las pichangas, las tardes en las terrazas. De todo corazón gracias. Y porque este no sea el fin.

No puedo olvidar al equipo de Arcadis y por la ayuda que me brindo todo este tiempo. A mi profesor guía Juan Carlos, por la confianza. A Wagner por la paciencia y la ayuda. De corazón gracias.

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

1. Introducción y organización de la memoria

1.1. Introducción

El Metro de Santiago ha tenido una expansión muy importante en los últimos 20 años, mejorando sustancialmente la calidad del servicio que ofrece y aumentando la tecnología necesaria para el buen funcionamiento de esta red de transporte. Las últimas dos líneas que se inauguraron (Líneas 3 y 6) cuentan con tecnología avanzada tanto en los nuevos trenes como en las estaciones:

En las estaciones:

- Entradas bidireccionales que permiten tanto la entrada como la salida de los pasajeros, mejorando el flujo en horarios valle y punta.
- Sistemas de puertas de andén que permiten disminuir los tiempos de detención de los trenes en las estaciones, se desarrolla la bajada y entrada de pasajeros de manera más ordenada y aumenta la seguridad de las personas al evitar caídas a las vías, además que se permite el máximo aprovechamiento del andén al no tener que dejar una franja de seguridad en el borde de éste.
- Sistemas de toma de corriente por vía aérea, lo que evita el tercer riel energizado de las antiguas líneas y por consiguiente elimina el riesgo de electrocución de las personas que por accidente o por trabajo descienden a las vías.

En los nuevos trenes:

- Pantallas y altavoces que comunican el sistema de tránsito del tren y en que estación se encuentra.
- Circulación sin la necesidad de un conductor. **Trenes UTO (Unattended Train Operation)**.
- Aire acondicionado.
- Trenes más amplios y con mayor capacidad de pasajeros.

Sin embargo, este aumento de tecnología no ha estado exento de problemas. Para poder llegar a tener esta tecnología se han tenido que hacer ciertos cambios con respecto a las antiguas líneas de Metro. Uno de estos cambios es el uso de ruedas de acero en los nuevos trenes en vez de las antiguas ruedas neumáticas. Si bien estas ruedas ofrecen mayor estabilidad para los trenes, permitiendo carros más amplios y aumentando la seguridad de circulación de los carros, estas ruedas también traen consigo distintas y mayores cargas en las vías. Estas cargas se traducen en vibraciones que antes no existían. Aunque se hayan dispuesto sistemas de control de estas vibraciones mediante Pads amortiguadores bajo los rieles, en algunos tramos este sistema no ha logrado contenerlas y no generar molestias alrededor de los túneles.

Esto motiva la realización de esta memoria, en la que se estudiarán las vibraciones a nivel de superficie de un modelo que represente los túneles de la Línea 3 del Metro, en la extensión hacia Quilicura mediante el software de diferencias finitas FLAC3D. Se simulará la carga de un tren en circulación en las vías y se comparará la respuesta en superficie para un sistema sin medidas de control (extra a los *pads*) y otro un sistema compuesto de una manta elastomérica dispuesta sobre el revestimiento de la contra bóveda del túnel y bajo la losa de la subestructura de las vías del túnel. También se comparará este modelo con uno que contenga un túnel tipo *Herradura* con el fin de estudiar el impacto de la forma del túnel en las vibraciones superficiales.

Para llevar a cabo esta memoria fue necesario juntar información de la modelación de vibraciones y medidas de control de éstas. Luego una recopilación de la información de los túneles, parámetros geotécnicos y de la información de los carros de Metro. Se simula las etapas de construcción de los túneles (ARCADIS, 2013) y se recrea la metodología de un estudio similar (Layera, 2018) para encontrar el equilibrio estático y luego proceder al análisis dinámico de las vibraciones en superficie.

1.2. Organización de la memoria

Este trabajo estará compuesto por 10 capítulos, los cuales se resumen a continuación:

Capítulo 2: Se comenta de las razones que motivaron a realizar este trabajo. Mostrando antecedentes de las líneas del Metro. Se detalla el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance de la memoria.

Capítulo 3: Se describe la metodología a seguir para llevar a cabo este trabajo de memoria.

Capítulo 4: Se presenta la revisión bibliográfica y el marco teórico de este trabajo, que involucra mecánica y dinámica de las vías férreas, propagación de ondas, cargas dinámicas y sistemas de control y amortiguación de vibraciones.

Capítulo 5: Corresponde a los antecedentes técnicos en los que se mueve este trabajo de memoria. Se detallan aspectos de la estratigrafía, la estructura del túnel a estudiar, datos de los carros y vía presentes en la línea de estudio, además de simplificaciones llevadas a cabo para obtener ciertos cálculos.

Capítulo 6: Se explican los modelos de estudio tanto analíticos como numéricos y los pasos a seguir para llegar a los modelos finales de estudio.

Capítulo 7: Se muestran los resultados obtenidos. Se compara las vibraciones obtenidas con y sin sistema de amortiguamiento.

Capítulo 8: Son analizados los resultados obtenidos en los capítulos 6 y 7 recogiendo las principales conclusiones y se hacen recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 9: Se presenta la bibliografía usada en este trabajo.

Capítulo 10: Anexos.

2. Motivación, Objetivos y Alcance

2.1. Motivación

El constante crecimiento de las ciudades requiere que los sistemas de transporte en ellas sean lo más eficientes, seguros y limpios (para el medio ambiente) posible. En este contexto el transporte ferroviario, ya sea en superficie o en túneles cumple los requisitos antes mencionados mejor que cualquier otro sistema de transporte. Esto se debe, entre otras cosas, a la baja incidencia espacial que requiere y a que posee un flujo de pasajeros continuo, sin mayores interrupciones en comparación con otros medios de transporte. Sin embargo, los trenes no están exentos de inconvenientes. Uno de los principales problemas que presenta este medio de transporte, al estar insertos en medio de las ciudades, es que las emisiones de ruido y de vibraciones son altas, lo que puede resultar molesto para las personas que viven cerca de líneas de trenes. Estas vibraciones son provocadas por las irregularidades de la vía, ya sean defectos en el riel mismo y/o de la rueda y por las variaciones verticales y horizontales del punto de contacto entre la rueda y el riel. Estas ondas vibratorias se transmiten desde el punto de contacto de la carga hacia las subestructuras, el revestimiento del túnel (o directamente al suelo en caso de vías superficiales) y luego al terreno, el cual propaga estas vibraciones en todas direcciones, tal como se puede ver en la Figura 2. 1 (Montalvo, 2007).

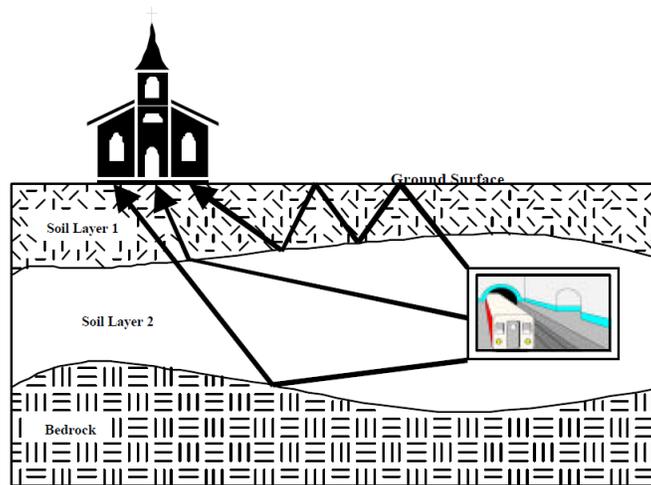


Figura 2. 1 Vibración superficial debido al tráfico de trenes subterráneos. (Montalvo, 2007)

En base a lo anterior, resulta interesante estudiar las vibraciones provocadas en las nuevas líneas del Metro de Santiago (líneas 3 y 6). Este es un problema que se ha presentado en este último tiempo (desde aproximadamente 2018), debido al cambio de ruedas neumáticas a ruedas de acero de los nuevos trenes de las líneas 3 y 6 respectivamente y a la cercanía de estas líneas con las viviendas y lugares de trabajo.

2.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo se dividen en objetivo general y objetivos específicos de la memoria. El principal objetivo de esta memoria es evaluar un modelo teórico – numérico de un sistema de control de vibraciones producidos en las vías de Metro de Santiago, que sea factible económica y constructivamente, comparando con el sistema base de Metro usado en línea 3 actualmente en operación.

Además, se agregan los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo numérico en FLAC3D para simular las vibraciones generadas a nivel de superficie, como también en el terreno alrededor del túnel.
- Estudiar las vibraciones que provoca la circulación de trenes en la estructura de túnel.
- Estudiar los principales componentes de vibraciones en el suelo y como varía con la distancia.
- Comparar los resultados de modelos con sistemas de control de vibraciones más robusto y el sistema de control utilizado actualmente en las líneas 3 y 6 del Metro.
- Comparar las vibraciones obtenidas para dos tipos de túneles, túnel con *Contrabóveda* y túnel de tipo *Herradura*, bajo las mismas condiciones de carga y construidos un mismo tipo de suelo.

2.3. Alcance

El alcance de este trabajo se limita a estudiar un tipo de túnel situado en la zona norte de Santiago (comuna de Quilicura), específicamente en la Extensión de la Línea 3 actualmente en construcción, entre las estaciones Lo Cruzat y la Estación Combinación EFE (tal como se mostrará en el apartado 5.2). Esta memoria se limita solamente a tramos rectos. Se estudiará distintas velocidades de circulación del tren para el análisis analítico del problema. Pero en el análisis numérico solo se estudiará la velocidad máxima de circulación de los trenes, es decir, 80 Km/h. Por último, el sistema de control a estudiar corresponde a una manta elastomérica dispuesta en la base de la losa de subestructura debido a la factibilidad de ésta a las condiciones de Metro, entendiéndose que hay muchos otros sistemas de control de vibraciones, pero que no es posible abarcarlos todos en este trabajo y puede quedar como motivación para otros futuros trabajos de investigación.

3. Metodología

Para llevar a cabo este trabajo de memoria se siguió la siguiente metodología:

Primeramente, se debió hacer una recopilación acerca de estudio de vibraciones provocadas por tránsito de trenes. Entre estos estudios se encuentran aquellos donde los trenes circulan en vías superficiales y en túneles. De estos estudios se extrae la información necesaria para organizar y dirigir el estudio. Se estudian y comparan los sistemas de control y mitigación de vibraciones que están propuestos y analizados con anterioridad. En base a la situación de Metro se decide optar por los métodos activos de control de vibraciones (se explicará en el capítulo 4). Se recopilan diferentes formas de cómo modelar las cargas dinámicas provocadas por el tránsito de trenes. Una vez elegida la manera más adecuada se utiliza el software Matlab para estudiar y generar la carga dinámica. Esta corresponde a una fuerza de contacto que se produce por las irregularidades que puedan tener los rieles (contacto entre ruedas y rieles). Estas irregularidades solo se estudiarán en el plano vertical y por consiguiente la carga dinámica modelada será, también, en dirección vertical. Esto es debido, básicamente, a la complejidad de las cargas reales que conlleva este contacto entre la rueda y el riel, además de la información recopilada y a modo de simplificación del estudio.

Una vez generada la carga se crea un modelo de túnel en el software FLAC 3D. En primer lugar, se debe calibrar los parámetros geotécnicos de este modelo. Para conseguir esto se siguen metodologías constructivas realizadas anteriormente en dicho software (Layera, 2018). Se realiza el proceso constructivo del túnel y se comparan los resultados de los asentamientos verticales obtenidos en superficie obtenidos en el modelo con un estudio realizado previamente en circunstancias lo más similares posible. Para el estudio de los parámetros dinámicos se ejecutan modelos más sencillos asumiendo deformaciones planas del suelo. Para esto se realiza un modelo de un metro de longitud y se estudian efectos en los resultados a causa de la modificación de ciertas variables. Entre estas variables estudiadas son:

- Valor del amortiguamiento del suelo. Se eligen amortiguamientos típicos encontrados en la literatura. Para este caso se eligen 2, 3 y 5% de amortiguamiento del suelo.
- Tamaño del elemento. Dada su influencia en la propagación de las ondas, tiempo y precisión en los cálculos, se estudia las diferencias encontradas para un modelo de mallado fino, capaz de propagar frecuencias hasta 63 Hz y un modelo de mallado más grueso, que permite el correcto paso de ondas a 25 Hz.

Con la información obtenida, se elige el modelo definitivo a estudiar con el fin de comparar las vibraciones obtenidas en superficie para tres modelos diferentes. Éstos son:

- Modelo Base: se modelan el suelo, el revestimiento del túnel y la losa de la subestructura de las vías, omitiendo los rieles y los *pads* para optimizar tiempos de cálculos.
- Modelo con manta elastomérica: se modelan el suelo, el revestimiento del túnel, la losa de la subestructura y se le agrega un elemento amortiguador entre el revestimiento y la losa. Este elemento es modelado como un material elástico de baja rigidez.
- Modelo Túnel tipo Herradura: se modela el suelo, revestimiento y losa de la subestructura.

Finalmente se estudian y analizan las vibraciones obtenidas en la superficie libre.

4. Estado del conocimiento

4.1. Generalidades

El siguiente apartado explicará de la forma más ilustrativa posible los mecanismos y condiciones con los cuales se generan las vibraciones y llegan a la superficie, donde son percibidas por las personas, ya sea a nivel de terreno o estructuras habitacionales.

Las vibraciones son producidas por el tráfico de trenes en las vías del metro. Esta carga en movimiento, que se define como una carga cuasi estática, va cambiando su punto de aplicación debido a las irregularidades de las vías y de las ruedas, además de los movimientos que se producen en el resto de los componentes del tren, movimientos de la caja y de los bogíes. Estas vibraciones son transmitidas a las subestructuras de la vía (riel, “pads” fijadores, losa, etc.), al revestimiento del túnel y luego son propagadas a través del suelo en todas direcciones (Figura 2. 1).

Al final del apartado se hace una reseña de estudios anteriores realizados en vibraciones y normativas extranjera acerca de regulaciones de vibraciones.

4.2. Cargas en las vías

Las cargas que produce un tren sobre las vías se pueden clasificar en tres grupos según la dirección de la fuerza, las fuerzas verticales, las fuerzas horizontales paralelas a la vía y fuerzas horizontales perpendiculares a la vía. Además, dependiendo de la naturaleza de la carga, estas pueden clasificarse como (Esveld, 2001):

- Cargas Cuasi - estáticas: que son el resultado del peso del tren repartido en los ejes, cargas producidas por el viento y por último la fuerza centrífuga a las curvas de las vías
- Cargas Dinámicas: causadas por las irregularidades de la vía, de las ruedas y la diferencia del punto de contacto ya, sea vertical u horizontal, discontinuidades en las soldaduras, etc.

Si bien las cargas estáticas no producen vibraciones deben ser consideradas debido al efecto de curvatura que producen en las vías. Las cargas cuasi – estáticas dependen de la velocidad de circulación. Mientras que los esfuerzos dinámicos son muy difíciles de obtener analíticamente debido a la dificultad que existe de cuantificar las irregularidades de los rieles, sin embargo, estos se pueden obtenerse mediante métodos experimentales.

4.2.1. Cargas Cuasi – Estáticas

Según Esveld (Esveld, 2001) la expresión para obtener la carga cuasi – estática es la siguiente:

$$Q_{qe} = Q_{est} + Q_{wind} + Q_{cent} \quad (4.1)$$

Donde:

Q_{est} : Corresponde al peso del tren repartido en los ejes

Q_{wind} : Corresponde a la carga que ejerce el viento sobre los trenes¹

¹ Esta carga será omitida para este estudio debido a que los trenes se encuentran bajo tierra y deberían ser considerados como cargas turbulentas, lo que escapa del alcance de esta memoria.

Q_{cent} : Carga que se genera en el riel externo debido a la carga centrífuga²

4.2.2. Cargas dinámicas

Se producen debido a diferentes factores:

- Defectos en la vía producidas por falta de mantenimiento, desgaste producto del frenado de tren, movimientos de lazo y cabeceo de las ruedas y trenes, pandeos en los rieles.
- Defectos en las ruedas y falta de redondez.
- Soldaduras poco prolijas, juntas, cambios de vías.
- Falta de mantenimiento de las ruedas y/o carriles por donde circulan los trenes

Para efecto de este trabajo, el cálculo de defectos en la vía se utilizará sistemas lineales, los cuales serán superpuestos, obtenidos *por resortes y amortiguadores* (Melis, 2002). Estos sistemas pueden ser muy complejos, considerando el tren completo con muchos grados de libertad, el cual debe ser resuelto mediante softwares sofisticados. Sin embargo, en la práctica, se pueden considerar modelos más sencillos, reduciendo el tren a una masa con resorte y amortiguadores que circula en las vías a una velocidad determinada. Lo anterior es posible debido a que las masas no suspendidas (que considera los ejes y las ruedas) provocan casi la totalidad de las vibraciones, mientras que las masas suspendidas (bogíes y cajas) aportan muy poco a los esfuerzos dinámicos sobre el carril (Melis, 2002). Este último modelo se esquematiza en la Figura 4. 1.

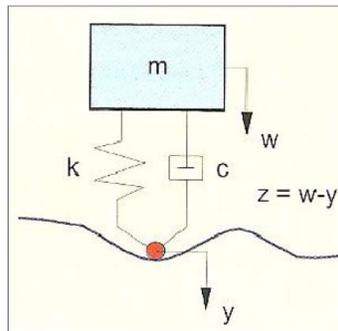


Figura 4. 1 Esquema modelo ferroviario sencillo. (Esveld, 2001)

En la mecánica de trenes se puede modelar las cargas de los trenes como impulsos de Dirac, donde la carga se distribuye en el riel a medida que las ruedas se acercan al punto donde se mide. Para esto se simula una carga estática igual al peso total del tren repartido en las ruedas, se estima la deformación que sufre la subestructura y luego de parametrizarla, se hace variar en el tiempo. Sin embargo, para efecto de la determinación de la carga dinámica que se utilizará en este trabajo se resolverá un modelo plano de 7 grados de libertad (todos ellos verticales), el cual será explicado en el capítulo 6. La ecuación de movimiento gobernante del modelo anterior se muestra a continuación

$$m * \omega'' + c * \omega' + k * \omega - k * y = 0 \quad (4.2)$$

² Esta carga tampoco se considera debido a que solo se estudiarán tramos rectos

Donde:

ω = es el movimiento vertical de la masa

ω' = es la velocidad vertical de la masa

ω'' = es la aceleración vertical de la masa

y = es el movimiento vertical de las ruedas

k = constante elástica del amortiguador (modelado como resorte de constante k)

Al resolver la ecuación anterior se obtienen los desplazamientos verticales de la masa, como así también la velocidad y la aceleración respectivamente. Luego las cargas dinámicas que ejerce este modelo se calculan mediante:

$$F_{din} = m_{NS} * a_{c_{mNS}} \quad (4.3)$$

Finalmente, la carga total ejercida es la suma de la carga estática con la carga dinámica.

$$F_{tot} = F_{est} + F_{din} \quad (4.4)$$

En el caso en que una vía se encuentre en perfecto estado, de igual manera se producirán esfuerzos dinámicos debido a la marcha del tren. Esto es producido por el cambio de deflexión en la vía cuando las ruedas se encuentran en traviesas, pads o fijadores de los rieles o cuando se encuentran entre éstos. Los asientos se pueden calcular mediante modelos de vigas como el estudiado por Timoshenko o bien el método de Unold-Dischinger. El efecto dinámico se obtiene mediante la diferencia entre estas dos cotas verticales producto de los asientos en la vía. Así la vía en perfecto estado pasa a ser una vía con perfil (vertical) sinodal de amplitud corresponde a la diferencia en las dos cotas, cuya longitud de onda corresponde a la separación entre los apoyos de las vías.

Además de los modelos anteriores, también se ha estimado la carga dinámica mediante otros métodos numéricos más sencillos, simplemente modificando la carga estática con un factor K_v . Dentro de estos métodos destacan:

Método Winkler:

$$K_v = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{40000}} \quad (4.5)$$

Método Driessen:

$$K_v = 1 + \frac{v^2}{30000} \quad (4.6)$$

Método Eisenmann:

$$\phi = 1 + \frac{v-60}{140} \quad (4.7)$$

De modo que la carga dinámica de Eisenmann queda de la siguiente manera:

$$Q_d = Q_e * (1 + n\alpha\phi) + Q_{ce} \quad (4.8)$$

Donde v es la velocidad de circulación del tren en $\left[\frac{km}{h}\right]$, Q_e es la carga estática afectada por el coeficiente de mayoramiento dinámica, Q_{ce} es la carga cuasi – estática que considera solo el aporte

de la fuerza centrífuga y la carga del viento sobre el tren. El factor n es el intervalo de confianza del análisis cuyo valor puede ser 1,2 o 3. Mientras que el factor α es un valor que depende del estado de las vías y puede ser:

$$\alpha = \begin{cases} 0.1 \text{ para estado de vía muy bueno} \\ 0.2 \text{ para estado de vía regular} \\ 0.3 \text{ para estado de vía muy malo} \end{cases} \quad (4.9)$$

4.2.3. Cargas Longitudinales

Estas cargas se producen principalmente debido a la dilatación o contracción térmica de las vías. También aparecen esfuerzos longitudinales debido al golpe de las ruedas en juntas, o bien por movimientos y cabeceos de éstas o por roce entre las vías y la rueda.

4.3. Propagación de las ondas en el terreno

Como se mencionó anteriormente las ondas se producen por la circulación de la carga cuasi – estática en movimiento, la dinámica de los trenes y la interacción de las ruedas con los rieles, las cuales se propagan en el interior del túnel hacia el suelo alrededor. A continuación, se mencionan las principales ondas de interés en el análisis de vibraciones provocada por trenes.

4.3.1. Ondas sísmicas en medio elástico y continuo

Si un esfuerzo es aplicado rápidamente en un cuerpo, la parte del cuerpo más cercana al punto de aplicación se deformará y luego esta deformación se propagará al resto del espacio mediante ondas de presión o “*stress wave*” (Braja & Ramana, 2011). Los problemas de la propagación de ondas de presión se pueden dividir en tres categorías:

- Ondas de presión elásticas en una barra
- Ondas de presión en un semi - espacio
- Ondas de presión en un medio continuo e infinito

El apartado se centrará en esta última categoría debido a que se aproxima mejor al caso de estudio.

Para encontrar las ecuaciones de movimientos en el suelo se puede considerar como un medio continuo, infinito. De modo que se puede plantear ecuaciones de equilibrio dinámico a elementos de tamaño infinitesimal, considerando la teoría elástica. Para esto se necesita que las fuerzas resultantes en un cuerpo se encuentren en equilibrio Figura 4. 2

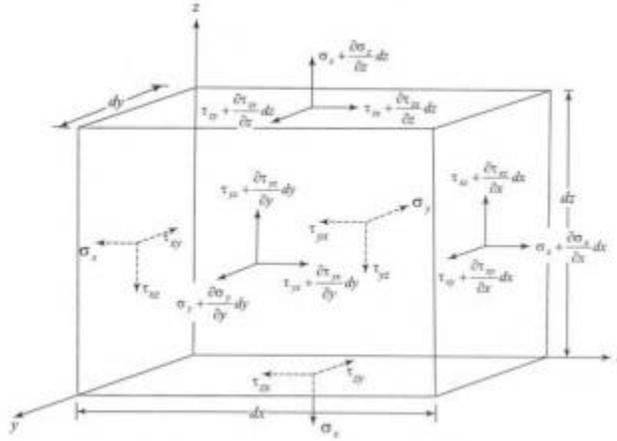


Figura 4. 2 Fuerzas acutantes en un cuerpo infinitesimal de tamaño $dx, dy dz$.

Donde el equilibrio (en una dirección determinada) se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\delta\sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{yx}}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta z} = \rho \frac{\delta^2 u_x}{\delta t^2} \quad (4.10)$$

Donde ρ es la densidad del medio y u_x es la componente “x” del desplazamiento en el tiempo. Esto se puede hacer en la dirección “y” y “z” respectivamente

$$\frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{zy}}{\delta z} = \rho \frac{\delta^2 u_y}{\delta t^2} \quad (4.11)$$

$$\frac{\delta\sigma_z}{\delta z} + \frac{\delta\tau_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{xz}}{\delta x} = \rho \frac{\delta^2 u_z}{\delta t^2} \quad (4.12)$$

Según las ecuaciones 4.10 a 4.12 y luego de relaciones matemáticas y consideraciones de tenso-deformación, relaciones de desplazamiento-deformación se obtienen las siguientes ecuaciones de una onda de dilatación sin rotación (4.13) y de rotación sin cambio de volumen (4.14):

$$\frac{\delta^2 \bar{\epsilon}}{\delta t^2} = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right) * \Delta \bar{\epsilon} \quad (4.13)$$

$$\frac{\delta}{\delta t^2} \left(\frac{\delta u_z}{\delta y} - \frac{\delta u_y}{\delta z} \right) = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) * \Delta \left(\frac{\delta u_z}{\delta y} - \frac{\delta u_y}{\delta z} \right) \quad (4.14)$$

Donde $\bar{\epsilon} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ corresponde al cambio volumétrico del elemento infinitesimal

La primera onda corresponde a una onda de compresión que se propaga con una velocidad conocida a través del medio, la cual se expresa mediante la ecuación mostrada en 4.15:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (4.15)$$

Esta onda también es conocida como *Onda Primaria*, *Onda P* u *Onda de compresión*. En la ecuación 4.15 pueden apreciarse las constantes de Lamé (λ y μ), mientras que ρ corresponde a la densidad del medio en que se propagan las ondas. Este tipo de ondas es una onda compresiva, longitudinal, es decir, que se contrae y dilata de forma paralela en la dirección de propagación (Figura 4. 3).

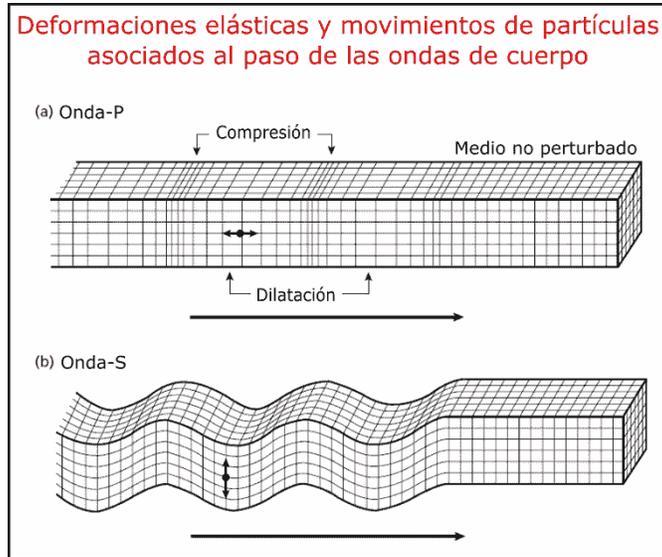


Figura 4. 3 Ondas de cuerpo en un medio elástico. Fuente (Montalvo, 2007)

La ecuación 4.14 corresponde a una onda de cuerpo que distorsiona el medio de forma perpendicular a la velocidad de propagación de la onda, es por esto por lo que es considerada una *Onda de Corte*, o también *Onda S* u *Onda Secundaria*. Estas ondas se pueden descomponer en dos ondas perpendiculares a la velocidad de propagación. Las ondas SH u Ondas de corte horizontales y las Ondas SV que corresponden a las ondas de corte verticales. La velocidad de propagación de estas ondas se puede calcular mediante la ecuación 4.16:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.16)$$

Al comparar ambas velocidades se obtiene la siguiente expresión

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (4.17)$$

Tal como se aprecia en la expresión 4.17 existen dos tipos de ondas de cuerpos que se propagan en medios infinitos y elásticos, pero con diferentes velocidades cada una. La Figura 4. 4 muestra la variación de esta relación en función del módulo de *Poisson*. Tal como muestra esta figura, la variación de 4.17 aumenta de manera exponencial a medida que aumenta ν y para cualquier valor que

éste tenga, la velocidad de onda primaria es siempre mayor que la onda secundaria. Además, cabe mencionar que mientras más rígido es el medio, más rápido se propagan las ondas.

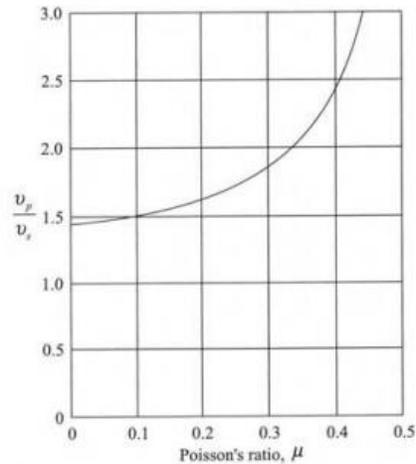


Figura 4. 4 Variación en la relación de velocidades de compresión y corte en función del módulo de Poisson. (Brajá & Ramana, 2011)

Lo expuesto anteriormente es válido siempre y cuando el medio de propagación sea un medio elástico, infinito, homogéneo y seco. Debido a que los suelos están compuestos de partículas sólidas, aire y agua, estas ecuaciones se pueden aplicar a ciertos suelos que se encuentren secos y sin demasiadas heterogeneidades en su composición. La propagación en medios saturados fue estudiada por Boit (1956), que involucra el esqueleto del suelo y además el índice de vacíos de éste. El estudio presentado por Boit muestra que:

- existen dos tipos de ondas compresivas (propagada a través del fluido y la otra a través del medio elástico o esqueleto del suelo) y
- una sola de corte, que se propaga solamente por el medio sólido, debido a la incapacidad del fluido de propagar ondas de corte.

La Figura 4. 5 muestra una comparación entre las velocidades de propagación para un medio saturado y seco encontrado experimental y teóricamente. Además de su variación con respecto a la presión de confinamiento. La línea continua corresponde a los resultados teóricos y la línea punteada corresponde a los resultados experimentales.

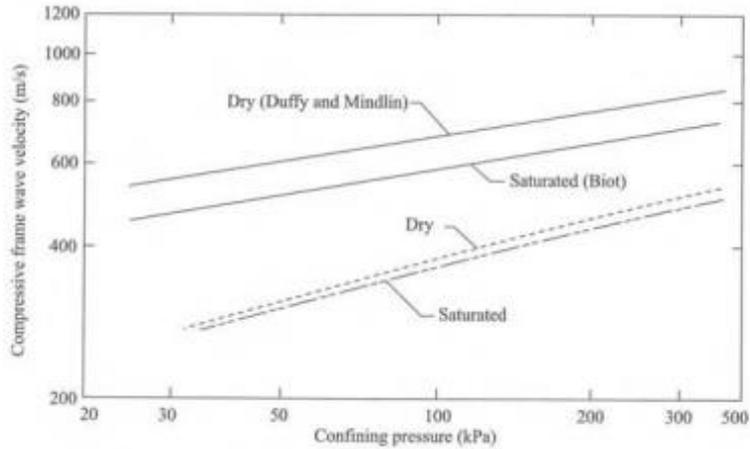


Figura 4. 5 Comparación de resultados teóricos y experimentales de la velocidad de onda compresiva de cuerpo en suelos secos y saturados en arena Ottawa (Braja & Ramana, 2011).

La velocidad de propagación de las ondas de corte en un medio saturado puede ser calculado mediante 4.18:

$$v_w = \sqrt{\frac{B_w}{\rho_w}} \quad (4.18)$$

Dónde B_w es el módulo de compresibilidad y ρ_w es la densidad del agua.

La Figura 4. 6 muestra la variación de la velocidad de la onda de corte para la arena Ottawa para un mismo nivel de índice de vacíos, en condición seca, drenada y saturada. Es posible observar que la variación es casi nula para estas 3 situaciones por lo que se puede obviar en los cálculos (Braja & Ramana, 2011), para un confinamiento dado.

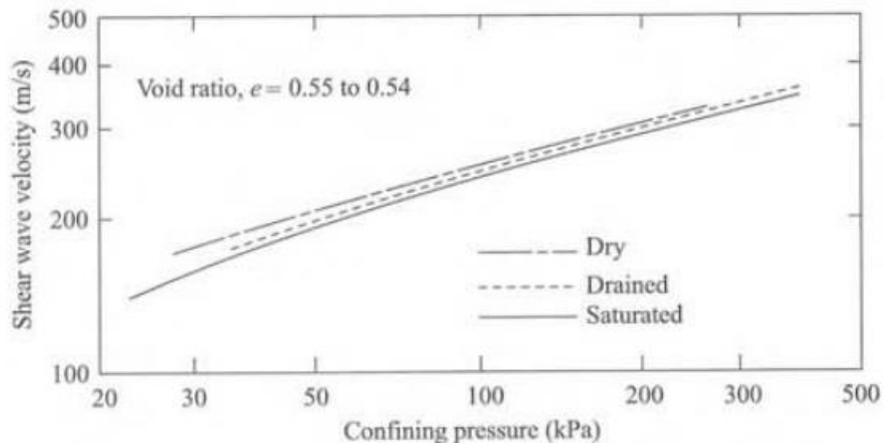


Figura 4. 6 Variación de la velocidad de onda de corte en Arena Ottawa, en función de la presión de confinamiento.

De lo anterior se puede deducir que:

- En un suelo saturado las velocidades de onda de compresión son más lentas que en un suelo seco debido a la influencia del agua.

- No existe mucha diferencia en las velocidades de onda de corte para condiciones de suelo seca, parcialmente saturados y completamente saturado. Sino que la diferencia radica en los distintos niveles de densidad del suelo.

El nivel freático también influye de manera significativa en la velocidad de onda, ya que a este nivel la velocidad de onda compresiva disminuye fuertemente

4.3.2. Propagación de ondas en semi – espacios elásticos

Las condiciones de borde asociadas a la superficie libre permiten soluciones adicionales a las ecuaciones obtenidas anteriormente, las cuales describen movimientos relacionados con movimientos de las ondas a poca profundidad, es decir, ondas de superficie. Estas ondas son de suma importancia debido a la cercanía de la vida humana a la superficie de la Tierra.

Existen varios tipos de ondas superficiales sin embargo las de mayor importancia en la ingeniería sísmica son las ondas *Rayleigh* y las ondas *Love*.

4.3.2.1. Ondas *Rayleigh*

Estas ondas existen en las cercanías de la superficie de un medio (semi - espacio) homogéneo elástico. Se pueden describir como una onda plana moviéndose en una dirección dada, supongamos dirección x (paralelo a la línea superficial), sin movimientos en la dirección y , de modo que todo el movimiento ocurre en un plano x - z (eje vertical). De este modo la onda *Rayleigh* se puede pensar como una combinación entre la onda P y la onda S (SV en este caso, considerando el eje z como un eje vertical), que cumplen con las condiciones de borde impuestas por el semi espacio (superficie libre, es decir que las tensiones de corte y normales en la superficie libre deben ser igual a cero). Existen dos funciones potenciales que describen el movimiento de las ondas, estas son:

$$u_x = \frac{\delta\phi}{\delta x} + \frac{\delta\psi}{\delta z} \quad (4.19)$$

$$u_z = \frac{\delta\phi}{\delta z} - \frac{\delta\psi}{\delta x} \quad (4.20)$$

Donde ψ y ϕ son las funciones potenciales, las cuales sirven para separar los efectos de dilatación y de rotación de la onda. La primera puede ser descrita mediante 4.21

$$\bar{\epsilon} = \frac{\delta u_x}{\delta x} + \frac{\delta u_z}{\delta z} = \frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2\psi}{\delta z^2} = \nabla^2\phi \quad (4.21)$$

Mientras que la rotación en el plano x - z está dado por 4.22

$$\Omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_x}{\delta z} - \frac{\delta u_z}{\delta x} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta^2\psi}{\delta z^2} - \frac{\delta^2\psi}{\delta x^2} \right) = \frac{1}{2} \nabla^2\psi \quad (4.22)$$

Resolviendo las ecuaciones 4.21 y 4.22 es posible obtener las ecuaciones finales que describen el movimiento de las ondas en superficie (Braja & Ramana, 2011) (Kramer, 1996):

$$\frac{\delta^2\phi}{\delta t^2} = v_p^2 \Delta\phi = \left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho} \right) \nabla^2\phi \quad (4.23)$$

$$\frac{\delta^2\psi}{\delta t^2} = v_s^2 \Delta\psi = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \nabla^2\psi \quad (4.24)$$

Conocer estas ondas tiene importancia en la ingeniería sísmica, debido a que se puede conocer la rigidez de los suelos superficiales mediante la generación mecánica de estas ondas. La forma de movimiento de una onda *Rayleigh* se muestra en la Figura 4. 7

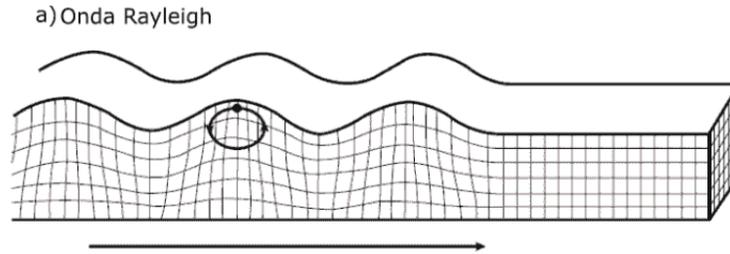


Figura 4. 7 Esquema de la deformaciones producidas en superficie por onda Rayleigh. (Maldonado, s.f.)

La Figura 4. 8 muestra como varía la velocidad de la onda *Rayleigh* en comparación con las ondas de cuerpo. Esta figura muestra que el comportamiento de esta onda es muy similar a la de la onda S en función del módulo de *Poisson*, manteniéndose casi constante. También es necesario mencionar que la velocidad de la onda *Rayleigh* es independiente de la frecuencia en un semi – espacio homogéneo (Kramer, 1996).

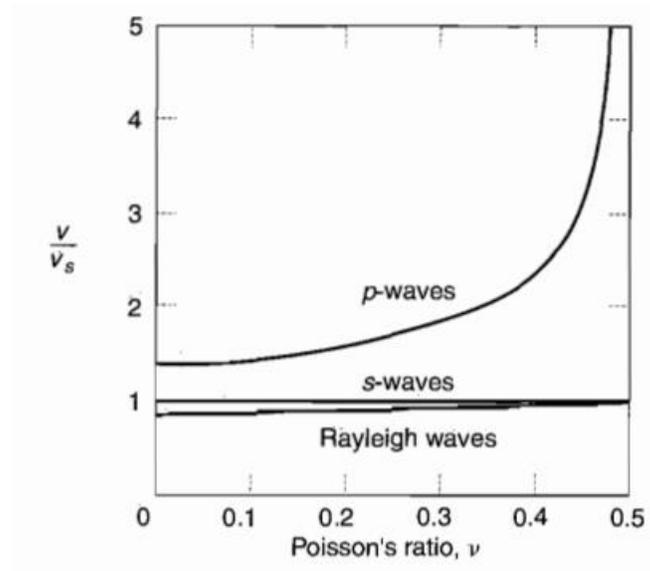


Figura 4. 8 Variación de la velocidad de onda Rayleigh y de cuerpo según el módulo de Poisson (Kramer, 1996).

El efecto de la profundidad en los desplazamientos inducidos por las ondas *Rayleigh* es estudiado en la Figura 4. 9. Esta figura muestra que la amplitud de movimiento es inversamente proporcional a la profundidad a la que se mide. Esta disminución en la amplitud se ve aumentada para suelos con módulos de *Poisson* más bajos. Cabe mencionar que la amplitud en la componente vertical tiene un aumento en la amplitud con respecto a la obtenida en superficie para profundidades someras, la cual decae rápidamente a medida que aumenta la profundidad.

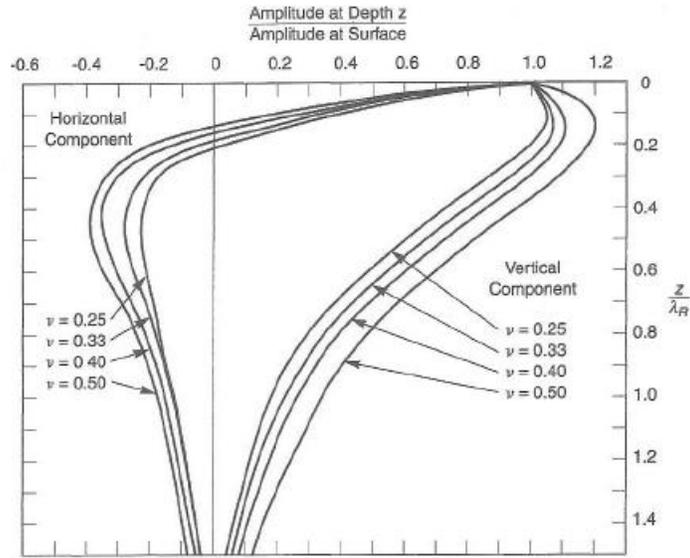


Figura 4. 9 Variación de la amplitud de movimiento en función de la profundidad, del índice de vacíos y longitud de onda λ_r . (Kramer, 1996)

4.3.2.2. Ondas Love

Este tipo de ondas se da en circunstancias en que existe un estrato de suelo “más blando”, de modo que la velocidad de propagación es baja en la superficie. Este tipo de perturbación corresponde a ondas SH que quedan “atrapadas” en la superficie debido a múltiples reflexiones con la capa superior. (Kramer, 1996). El movimiento de la oscilación corresponde a un movimiento horizontal, paralelo a la superficie y que es perpendicular a la velocidad de propagación. Tal como muestra la Figura 4. 10

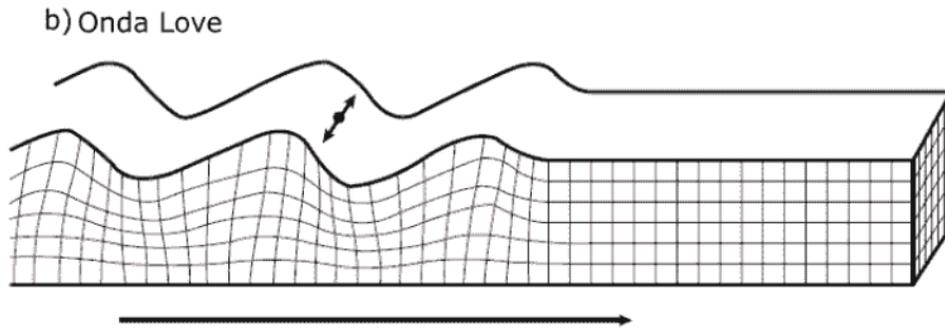


Figura 4. 10 Esquema de la deformaciones producidas en superficie por onda Love. (Maldonado, s.f.)

(Kramer, 1996) muestra que la velocidad de las ondas Love pueden obtenerse mediante la ecuación 4.25

$$\tan\left(\omega * H \sqrt{\left(\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}\right)}\right) = \frac{G_2}{G_1} * \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{v_L^2} - \frac{1}{v_{s2}^2}}{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}\right)} \quad (4.26)$$

Donde ω corresponde a la frecuencia angular de la onda, H corresponde al espesor del estrato de la capa blanda, v_{s1} y v_{s2} son las velocidades de la onda S del estrato 1 y 2 respectivamente y v_L

corresponde a la velocidad de la onda *Love*, mientras que G_1 y G_2 corresponden a los módulos de elasticidad transversal en los medios 1 y 2 respectivamente

La amplitud del desplazamiento y la velocidad de la onda pueden variar en función de la profundidad y en función de la frecuencia angular tal como se muestran en las siguientes figuras. Tal como se aprecia en la Figura 4. 11 el desplazamiento disminuye exponencialmente con la profundidad, donde se aprecia un punto en inflexión a la altura del espesor de la capa. Por otro lado, la Figura 4. 12 muestra una leve variación de la velocidad en función de la frecuencia, a diferencia de las ondas *Rayleigh*, donde se aproxima a la velocidad de corte en el medio 2 (semi - espacio) y a medida que aumenta la frecuencia se aproxima más a la velocidad en la capa superficial. Esto indica que las ondas *Love* son dispersivas. (Kramer, 1996). La dispersión es un fenómeno en el cual ondas de diferentes frecuencias y también de diferentes longitudes de onda se propagan a distintas velocidades. Así las ondas *Rayleigh* en un medio homogéneo son no dispersivas (Kramer, 1996). Sin embargo, en el mundo real, los medios completamente homogéneos no existen y son más bien heterogéneos, es por esto por lo que las ondas *Rayleigh* también son dispersivas.

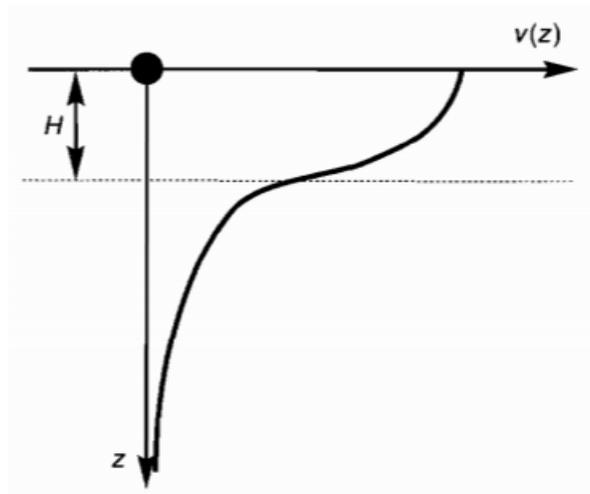


Figura 4. 11 Variación del desplazamiento “v” de la partícula en función de la profundidad (H) (Kramer, 1996)

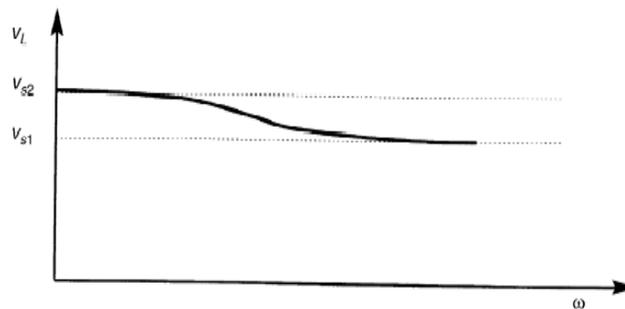


Figura 4. 12 Variación de la velocidad de onda Love (v_s) según la frecuencia (ω). (Kramer, 1996).

4.3.3. Atenuación de las ondas con la distancia

Si un impulso de corta duración afecta la superficie de un semi – espacio, las ondas de cuerpo y las ondas superficiales se propagarán alejándose radialmente desde la fuente hacia el exterior en forma de un frente cilíndrico de ondas. Primero llegarán las ondas *P*, luego las ondas *S* y finalmente las ondas superficiales, aumentando la energía de movimiento y la amplitud de oscilación con cada onda. Sin embargo, esta amplitud de desplazamiento disminuye gradualmente con la distancia. Cuando un frente de ondas se propaga, la energía disminuye de forma inversamente proporcional al radio al cuadrado, mientras la amplitud disminuye de forma inversa al radio.

$$Energia \propto \frac{1}{r^2} \quad (4.27a)$$

$$Amplitud \propto \frac{1}{r} \quad (4.27b)$$

La pérdida de amplitud y energía debido a la distancia es lo que se conoce como amortiguamiento geométrico. Esta pérdida también está unida a otro tipo de atenuación llamado *absorción* y es lo que se conoce como amortiguamiento material. Considerando ambos tipos de atenuación, es posible describir el movimiento vertical de las ondas *Rayleigh* mediante la relación entregada por Bornitz (Braja & Ramana, 2011):

$$u_{z_2} = u_{z_1} * \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} * \exp [-\beta(r_2 - r_1)] \quad (4.28)$$

Donde u_{z_1} y u_{z_2} son las amplitudes de onda a una distancia r_1 y r_2 respectivamente, mientras que β es el amortiguamiento material o coeficiente de absorción. Este último depende del tipo de suelo y sus características.

4.3.4. Ondas en un medio estratificado

La propagación de ondas en medios es una rama muy compleja en la que se deben tener en consideración muchas variables como lo son la topografía del lugar, la composición de los suelos y rocas, estratigrafía, distancias, etc. Debido a las limitantes y alcance de este trabajo se abordará el tema de la propagación de ondas en medios estratificados, tal como se encuentra el túnel en estudio de este trabajo.

Hasta el momento se han explicado los conceptos, en medios homogéneos y elásticos, sin embargo, cuando el medio es estratificado o con estructuras en superficie, los cambios de propiedades en la interfaz de los medios provocan que las ondas sufran el fenómeno propio de las ondas, como lo son la difracción, reflexión o refracción. Para entender bien los procesos que ocurren en estas configuraciones se deben estudiar a cabalidad lo que ocurre en las interfaces de los medios.

Cuando una onda llega a la interfaz (onda incidente) de dos medios, parte de la energía de la onda pasa de un medio al siguiente, otra parte de la energía se transmite a través de la interfaz y la última parte de la energía se refleja hacia el medio original. Esta situación presenta una dificultad extra debido a que los trenes de ondas reflejados y reflectados interactúan con otros frentes de ondas incidentes, produciéndose lo que se conoce como interferencia ya sea constructiva o destructiva. (Fernandez, 2014). Según (Kramer, 1996) la repartición de energía en la interfaz depende de la razón de la impedancia de los materiales o medios. Se define el radio de impedancia como

$$\alpha_z = \frac{\rho_2 * v_2}{\rho_1 * v_1} \quad (4.29)$$

Esta herramienta es útil para determinar la magnitud de desplazamiento de las ondas reflejadas y transmitidas de un medio a otro (Kramer, 1996) que se pueden obtener mediante (4.30a y 4.30b).

$$A_r = \frac{1-\alpha_z}{1+\alpha_z} * A_i \quad (4.30a)$$

$$A_t = \frac{2}{1+\alpha_z} * A_i \quad (4.30b)$$

Donde A_i, A_r y A_t son las amplitudes de las ondas incidente, reflejada y transmitida respectivamente. La Tabla 4. 1 muestra los valores de los desplazamientos y de las tensiones de las ondas.

Tabla 4. 1 Influencia del Radio de Impedancia en la amplitud de desplazamientos y tensiones de las ondas reflejadas y transmitidas.

Impedance Ratio, α_z	Displacement Amplitudes			Stress Amplitudes		
	Incident	Reflected	Transmitted	Incident	Reflected	Transmitted
0	A_i	A_i	$2A_i$	σ_i	$-\sigma_i$	0
$\frac{1}{4}$	A_i	$3A_i/5$	$8A_i/5$	σ_i	$-3\sigma_i/5$	$2\sigma_i/5$
$\frac{1}{2}$	A_i	$A_i/3$	$4A_i/3$	σ_i	$-\sigma_i/3$	$2\sigma_i/3$
1	A_i	0	A_i	σ_i	0	σ_i
2	A_i	$-A_i/3$	$2A_i/3$	σ_i	$\sigma_i/3$	$4\sigma_i/3$
4	A_i	$-3A_i/5$	$2A_i/5$	σ_i	$3\sigma_i/5$	$8\sigma_i/5$
∞	A_i	$-A_i$	0	σ_i	σ_i	$2\sigma_i$

4.4. Normas de vibraciones y Ruido

4.4.1. Introducción

Las vibraciones provocadas por cargas dinámicas en general no suelen ser problemas cotidianos, estructurales ni tampoco suelen afectar al funcionamiento de la maquinaria que la produce o que se encuentra cerca de la fuente de las vibraciones. Sin embargo, se debe tener en cuenta el nivel de vibraciones u oscilaciones que se producen por el tráfico de trenes y si éstos se encuentran en los niveles aceptables. Debido a que en Chile no existe una normativa que regule los niveles de ruido o vibraciones, se hará referencia a normas extranjeras para el control de las vibraciones.

4.4.2. Normas de aceptación de ruido

Existen diversos criterios de aceptación para los niveles de vibraciones dependiendo de la norma en cuestión. A continuación, se nombran algunos criterios para cuantificar los efectos ya sean a estructuras o a personas:

- Sobresfuerzos en elementos estructurales, tensiones o deformaciones inaceptables, que puedan generar fatigas o fallas en los elementos
- Efectos perjudiciales a la salud o sensaciones molestas
- Efectos en actividades humanas o procesos productivos

4.4.2.1 Efectos estructurales

Los niveles de vibraciones producidos por la circulación de trenes no son capaces de generar problemas en elementos estructurales, debido a que las deformaciones y cargas impuestas no son suficientes para dañar los elementos. Sin embargo, se debe tener en consideración que elementos de hormigón armado pueden sufrir agrietamientos debido a cargas cíclicas importantes si son expuestas por periodos largos de tiempo. Esto lleva a tener especial cuidado con las losas de la sub – estructura de las vías, ya que el paso reiterado de los trenes puede provocar agrietamiento en estos elementos. Estas grietas se traducen en concentraciones de esfuerzos que conllevan a un mal funcionamiento de los elementos y posterior falla. La fatiga es comúnmente la principal razón de falla de material y se debe tener en cuenta al momento de diseñar para determinar correctamente la vida útil de los elementos. No existe una norma que tenga especial atención a elementos de hormigón sometidos a cargas cíclicas o de fatiga (Vargas, 2015). Debido a esto se nombran normas principales en el mundo que exponen criterios estructurales para restringir vibraciones, estas son (Fernandez, 2014):

- Normativa DIN 4150, parte 3 (1999)
- Normativa SN 640312 (1978)
- ISO 4866 (1990)
- UNE 22-381-93

Para efectos de este estudio, los criterios estructurales solo se deberían tomar en cuenta para la losa que sostiene los elementos de vía, debido a la variabilidad de la carga en el tiempo y la alta exposición de esta frente a la carga de los trenes circulando y los niveles de vibraciones que son sometidos directamente en las losas. En superficie debido al entorno donde se encuentra embebido el estudio, los niveles de vibraciones son pequeños, y las casas que circundan el sector de estudio son estructuras pequeñas, de alta rigidez, de modo que se asume que los niveles de las vibraciones no serán problemas para las estructuras.

4.4.2.2. Efecto Psicológicos

Este es sin duda el efecto más importante para tener en consideración en este estudio. El estudio de esta memoria se encuentra inserto en una zona residencial, es por esto que limitar las vibraciones debe ser pensando en que los umbrales han de ser más bajos que niveles que los cataloguen como molestos y/o perceptible para las personas en reposo. Dado que la circulación de los trenes es solamente en horarios diurnos, se permite una holgura en los niveles de vibraciones obtenidos, pero en caso de que los trenes transiten de noche, se debe tener especial cuidado ya que las vibraciones pueden ser más percibidas o incluso generar oscilaciones en vidrios y ventanas que generan ruidos molestos.

Existen diversos factores que afectan a la percepción de las vibraciones en las personas, tales como el estado de actividad de la persona, ya sea reposo o movimiento, el lugar donde se encuentre (efecto sitio), tipo de edificación, distancia a la fuente de vibraciones, posición en la que se encuentra la persona (vertical u horizontal), frecuencia de las vibraciones, duración e intensidad. A continuación, se muestran algunas figuras que determinan los niveles perceptibles de las vibraciones en función de las vibraciones, ya sea el nivel de deformaciones que generan, su velocidad o su aceleración:

Tabla 4. 2 Clasificación de las vibraciones y su nivel de percepción para las personas (Bachmann & Ammann, 1987).

vibration effects on people	frequencies 1 ÷ 10 Hz a_{\max} [mm/s ²]	frequencies 10 ÷ 100 Hz v_{\max} [mm/s]
imperceptible	10	0.16
just perceptible	40	0.64
clearly perceptible	125	2.0
annoying	400	6.4
unpleasant, painful if lasting	1000	16.0
harmful	> 1000	> 16.0

Se aprecia que dependiendo de la frecuencia de la vibración se deberá restringir la aceleración (frecuencias menores a 10 Hz) o bien la velocidad (entre 10 y 100 Hz). Se muestra los niveles de aceleración para los criterios imperceptibles, apenas perceptibles, claramente perceptible, molesto, desagradable y por último doloroso a dañino.

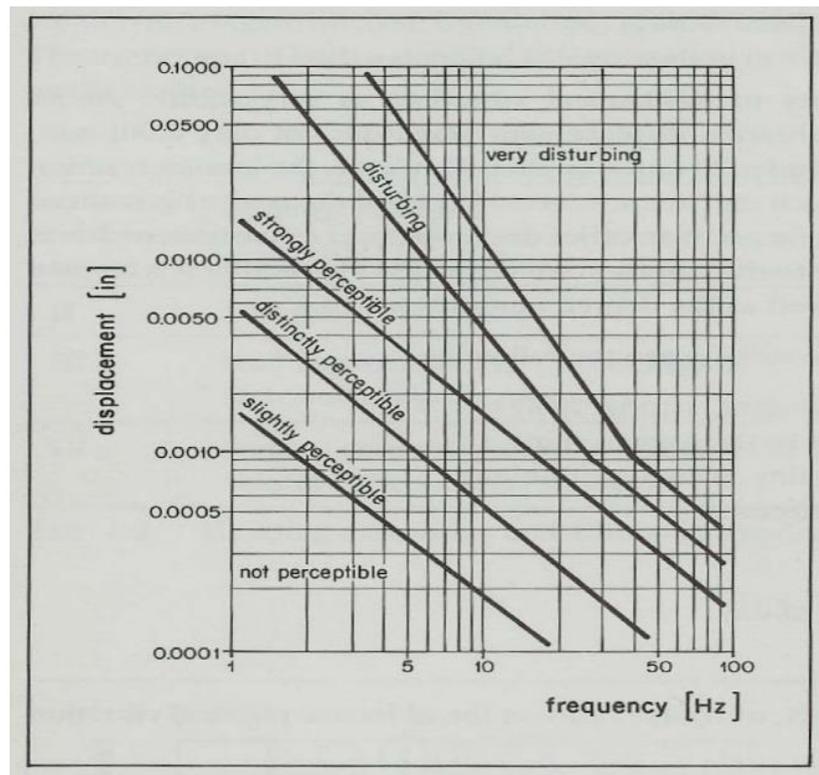


Figura 4. 13 Nivel de desplazamiento en función de la frecuencia y su clasificación (Wiss & Parmelee, 1974).

Muy similar a la tabla anterior se muestra los niveles de desplazamiento en función de la frecuencia y su nivel de percepción en las personas. Se clasifican los niveles como no perceptible, levemente perceptible, claramente perceptible, fuertemente perceptible, perturbador y muy perturbador. En este caso se ve la deformación pico que genera la vibración en función de la frecuencia. Un gráfico muy similar presenta (Ammann, 1987)

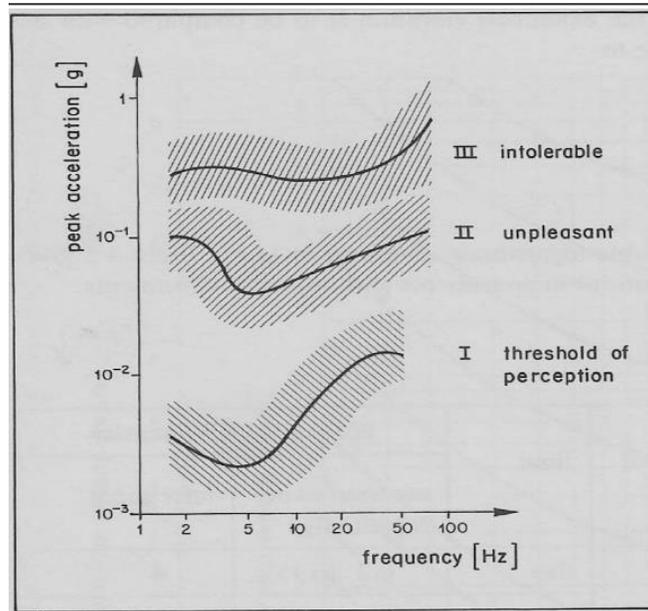


Figura 4. 14 Aceleración peak en función de la frecuencia y su clasificación (Gierke & Goldman, 1976).

Esta figura muestra cómo se clasifica la máxima aceleración en función de la frecuencia de excitación en intolerable, molesta y finalmente se llega al límite de la percepción.

También se debe tener en cuenta la posición en la que están las personas, la actividad en la que se encuentra la persona, ya que una persona en reposo es más susceptible a las vibraciones, la dirección principal de la vibración también es un factor que se debe tener en cuenta.

Según como se expresa en la norma DIN 4150 la ecuación 4.31 muestra el nivel de percepción de la vibración en función de la frecuencia y el desplazamiento que esta genera:

$$KB = d * \frac{0.8f^2}{\sqrt{1+0.032*f}} \quad (4.31)$$

Este es un valor empírico donde d se mide en mm y f en Hz. Esta expresión se puede transformar también en función de la velocidad y la aceleración mediante las fórmulas 4.32a y 4.32b

$$d = \frac{v}{2*\pi*f} \quad (4.32a)$$

$$d = \frac{a}{4*\pi^2*f^2} \quad (4.32b)$$

Finalmente, los valores obtenidos de KB deben compararse con la Tabla 4. 3

Tabla 4. 3 Valores de KB para edificaciones residenciales (German Institute of Standards, 1999).

building zone (actual utilization and development of the estate within radius of vibration emission)	time	acceptable KB intensity	
		continuous or repeatedly	infrequent
purely residential, housing estate, holiday resort	day	0.2 (0.15 [*])	4
	night	0.15 (0.1 [*])	0.15
village and small business, town-centres	day	0.3 (0.2 [*])	8
	night	0.2	0.2
business and trade (incl. offices)	day	0.4	12
	night	0.3	0.3
industrial	day	0.6	12
	night	0.4	0.4
exceptional areas (acc. to residential content)	day	0.1 ÷ 0.6	4 ÷ 12
	night	0.1 ÷ 0.4	0.15 ÷ 0.4

(*) Values in brackets should be complied with if buildings are exited horizontally with a frequency below ~ 5 Hz.

Finalmente se muestran otras tablas comparativas que muestran la respuesta humana frente a distintos niveles de vibraciones en función de las frecuencias.

Tabla 4. 4 Respuesta humana frente a diferentes niveles de vibracion y ruido generadas en Terreno (FTA, 2006)

Table 7-1. Human Response to Different Levels of Ground-Borne Noise and Vibration			
Vib. Velocity Level	Noise Level		Human Response
	Low Freq1	Mid Freq2	
65 VdB	25 dBA	40 dBA	Approximate threshold of perception for many humans. Low-frequency sound usually inaudible, mid-frequency sound excessive for quiet sleeping areas.
75 VdB	35 dBA	50 dBA	Approximate dividing line between barely perceptible and distinctly perceptible. Many people find transit vibration at this level annoying. Low-frequency noise acceptable for sleeping areas, mid-frequency noise annoying in most quiet occupied areas.
85 VdB	45 dBA	60 dBA	Vibration acceptable only if there are an infrequent number of events per day. Low-frequency noise annoying for sleeping areas, mid-frequency noise annoying even for infrequent events with institutional land uses such as schools and churches.

Notes:
1. Approximate noise level when vibration spectrum peak is near 30 Hz.
2. Approximate noise level when vibration spectrum peak is near 60 Hz.

Tabla 4. 5 Ground-Borne Vibration (GBV) y Ground-Borne Noise (GBN) y criterios de impactos (FTA, 2006).

Table 8-1. Ground-Borne Vibration (GBV) and Ground-Borne Noise (GBN) Impact Criteria for General Assessment						
Land Use Category	GBV Impact Levels (VdB re 1 micro-inch /sec)			GBN Impact Levels (dB re 20 micro Pascals)		
	Frequent Events ¹	Occasional Events ²	Infrequent Events ³	Frequent Events ¹	Occasional Events ²	Infrequent Events ³
Category 1: Buildings where vibration would interfere with interior operations.	65 VdB ⁴	65 VdB ⁴	65 VdB ⁴	N/A ⁴	N/A ⁴	N/A ⁴
Category 2: Residences and buildings where people normally sleep.	72 VdB	75 VdB	80 VdB	35 dBA	38 dBA	43 dBA
Category 3: Institutional land uses with primarily daytime use.	75 VdB	78 VdB	83 VdB	40 dBA	43 dBA	48 dBA

Notes:

- "Frequent Events" is defined as more than 70 vibration events of the same source per day. Most rapid transit projects fall into this category.
- "Occasional Events" is defined as between 30 and 70 vibration events of the same source per day. Most commuter trunk lines have this many operations.
- "Infrequent Events" is defined as fewer than 30 vibration events of the same kind per day. This category includes most commuter rail branch lines.
- This criterion limit is based on levels that are acceptable for most moderately sensitive equipment such as optical microscopes. Vibration-sensitive manufacturing or research will require detailed evaluation to define the acceptable vibration levels. Ensuring lower vibration levels in a building often requires special design of the HVAC systems and stiffened floors.
- Vibration-sensitive equipment is generally not sensitive to ground-borne noise.

FTA 2006

La FTA (Federal Transit Administration) muestra más tablas adicionales a las ya expuestas (FTA, 2006) pero en este caso se escapan del interés de este estudio por lo que no son nombradas en este apartado.

4.5. Medidas de Mitigación de vibraciones

En muchas partes del mundo y sobre todo en Europa dada la cercanía de líneas férreas a las ciudades y poblados es necesario tomar medidas frente a las vibraciones y el ruido que estas generan, sobre todo cuando estos niveles superan lo permitido por las normas locales. Estas medidas, si bien su efectividad no está del todo estudiada, son efectivas y existen de diversos tipos. En el siguiente sub capítulo se nombran las medidas de mitigación más comúnmente utilizadas.

Las medidas de mitigación de vibraciones se dividen principalmente en dos grupos, aquellas que se disponen en la fuente de generación de vibraciones o métodos activos de vibraciones y en aquellas que se disponen en los receptores de aquellas vibraciones o métodos pasivos.

4.5.1. Métodos Activos

Las vibraciones como se mencionó anteriormente en este capítulo son generadas por el contacto entre la rueda y los carriles y las irregularidades que estos puedan tener. En base a esto se nombran algunas medidas directamente en la fuente (Melis, 2002):

- Buen perfilado de las ruedas y de los rieles, ya que al reducir las irregularidades de éstos reduce directamente las vibraciones generadas
- Mantenimiento de las vías
- Reemplazo de ruedas rígidas por ruedas de caucho (neumáticas)
- Renovación de las ruedas

- Mejorar la alineación de los rieles con las ruedas
- Sistemas de suspensión en los elementos de sujeción de las vías (vías elásticas y amortiguadores bajo los pads o durmientes)

Otras medidas correctoras es disponer de mantas elastoméricas en la base de las vías lo que se conoce como losas flotantes. Esta medida ya ha sido altamente probada en muchos estudios anteriores como (Carman, 2012), (Garburg, 2007), (Wilson, 1977), (Wolfe, 1995). En la Figura 4. 15 (arriba) se muestra una vista en planta de la losa flotante, donde se aprecia los rieles sobre los pads, mientras que en la parte inferior de dicha figura se muestra como es el sistema de losa flotante en una vista de elevación.

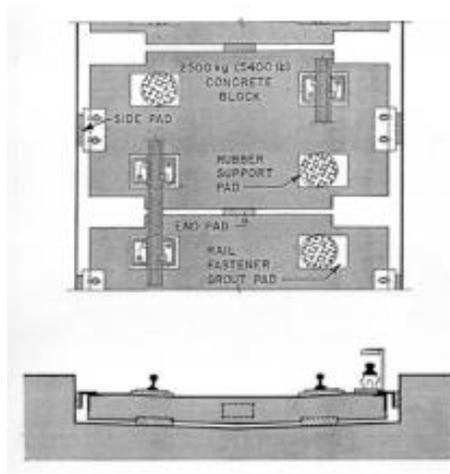


Figura 4. 15 Esquema de losa Flotante (Carman, 2012).

Esta es la medida más habitual que busca reducir vibraciones. Si bien está ampliamente estudiada, no se ha llegado a un consenso de su real efecto en reducción de vibraciones. Por otro lado, estas mantas tienen efectos positivos ya demostrados, que son la redistribución más uniforme de las cargas y ayuda al aumento de la vida útil en caso de que las vías estén sobre balasto. Existen diversos tipos de mantas elastoméricas que se pueden colocar bajo las losas (Mallafre, 2015):

- Mantas fabricadas por presión. Provenientes de neumáticos triturados que se ligan mediante matrices poliméricas
- Mantas de caucho y fibras

4.5.2. Métodos Pasivos

Como se mencionó, estos métodos se disponen en los receptores. Es la medida menos frecuente ya que implican mejoras o modificaciones en estructuras cercanas a la fuente, encareciendo mucho los proyectos llevándolos a no ser factibles en el ámbito económico. Estas medidas requieren modificar los cimientos de las estructuras por amortiguadores o resortes que aíslen el edificio de las vibraciones.

4.5.3. Métodos en la trayectoria de las ondas

Existen otros métodos que implican modificaciones en el terreno por donde viajan las ondas de ruido y vibraciones. Existen variadas formas de hacerlo, dentro de las cuales se pueden mencionar:

4.5.3.1. Trincheras

Este método consiste en aislar la fuente de vibración mediante la excavación de trincheras que rodeen la fuente, de esta manera el camino de las ondas se ve modificado, lo que implica una reducción de los niveles de vibraciones. Esto se debe principalmente a la amortiguación de la energía de las ondas por distancia. Este método es eficaz para reducir vibraciones de baja frecuencias (Fernandez, 2014), sin embargo, tiene la limitante de que es impracticable para túneles. (Alarcón, Hermanns, & Fraile, 2000), (Braja & Ramana, 2011) y (Mallafre, 2015).

Woods, Richart y Hall (Woods, Richart, & Hall, 1970) realizaron experimentos como el que muestra la Figura 4. 16 y consistían aplicar vibraciones verticales en terreno tratando de aislar un parte en concreto del terreno. Mediante acelerógrafos midió el desplazamiento vertical producidos por la fuente vibratoria.

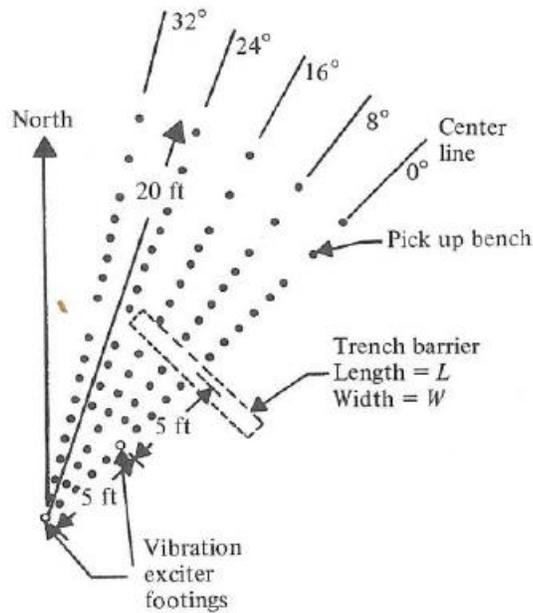


Figura 4. 16 Estudio experimental de aislamiento pasivo mediante zanjas abiertas (Woods, Richart, & Hall, 1970).

Experimentos similares se han llevado a cabo como por ejemplo aislar la zona mediante trincheras circulares alrededor de la fuente tal como muestra la Figura 4. 17. Se midieron las vibraciones verticales antes de realizar las zanjas y posterior a eso, con tal de medir la diferencia. Se introdujo el parámetro “Amplitude reduction factor (ARF)” (ecuación 4.33)

$$ARF = \frac{v_f}{v_0} \quad (4.33)$$

Donde v_0 es la amplitud de la deformación vertical antes de las trincheras y v_f es la deformación vertical después de las trincheras

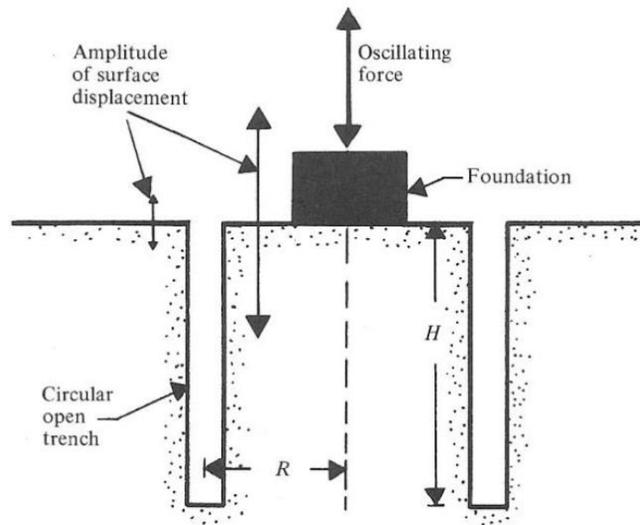


Figura 4. 17 Estudio experimental realizado por Wood (1969).

4.5.3.2. Pantallas

Ese tipo de medida correctiva consiste en la sustitución de parte del terreno circundante por materiales más rígidos que bloqueen el paso de las ondas. Se puede sustituir el suelo por materiales como: hormigón, jet grouting, planchas de acero, poliestirenos o bien con arcilla.

(Mallafré, 2015) realizó un estudio en trenes superficiales modelando pantallas de hormigón enterrado bajo las vías y comparó su efectividad con distintas profundidades del hormigón (1 2 y 3 metros de profundidad) y para distintos tipos de suelo.

- Aceleración vertical máxima absoluta:

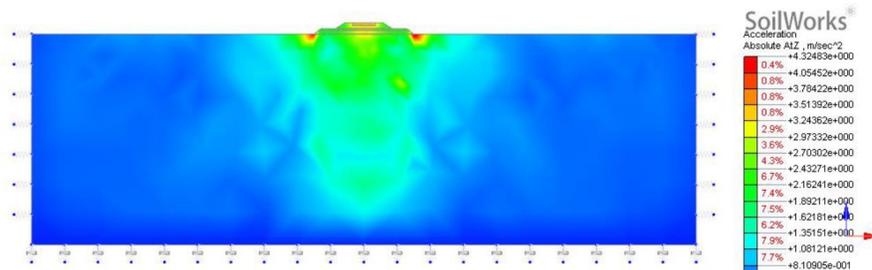


Figura 31. Aceleración máxima vertical - Suelo de arcilla - Sin bloque.

Figura 4. 18 Aceleraciones verticales maximas en el suelo. Sin bloque enterrado.

- Aceleración vertical máxima absoluta:

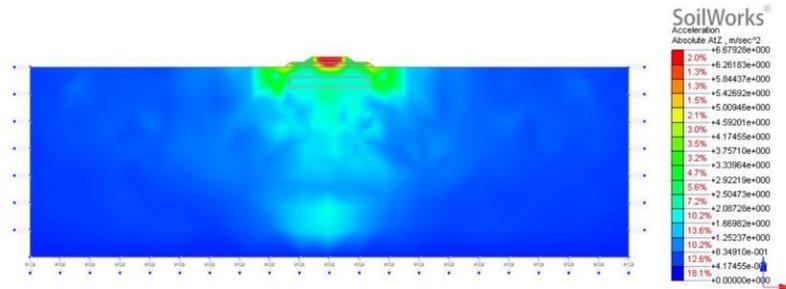


Figura 4. 19 Aceleracion Vertical máxima. Bloque enterrado 1 metro.

(Mallafré, 2015) concluyó que los bloques de hormigón reducen las vibraciones horizontales y verticales en las 3 configuraciones y para los distintos tipos de suelo. En general las vibraciones horizontales se ven más disminuidas que las verticales. Para casos de mayor profundidad (mayor a un metro de profundidad) del bloque no disminuye las vibraciones en superficie, pero tiene mayores efectos en profundidad, lo que serviría para proteger fundaciones o estructuras enterradas cercanas.

4.5.3.3. Otros métodos

Entre otros métodos que se han estudiado se encuentran:

- Mejoras de terreno, como compactación del suelo bajo las estructuras de las vías. Esta mejora incluye la sustitución de suelo
- Pantallas de acero enterradas que reflejen las ondas hacia abajo o hacia adentro, impidiendo la propagación hacia la superficie
- Pilares de hormigón enterrados en diferentes puntos que rigidizan el suelo alrededor e impiden la propagación libre de las ondas

5. Antecedentes

5.1. Introducción

En Santiago de Chile se encuentra hoy el sistema de Metro (Figura 5. 1) más extenso de Sudamérica, el segundo de Latinoamérica (solamente superado por el sistema de Ciudad de México), uno de los más tecnológicos de esta misma zona y el séptimo sistema con la frecuencia más regular a nivel mundial.

Actualmente Metro cuenta con 7 líneas, 136 estaciones cubriendo un total de 140 km aproximadamente de recorrido, dentro de los cuales se transportan cerca de 2.5 millones de pasajeros diariamente. Metro se encuentra en extensión de dos líneas (2 y 3) y en procesos de licitación de otras 3 líneas nuevas (7, 8 y 9) que se esperan estén funcionando para 2025.

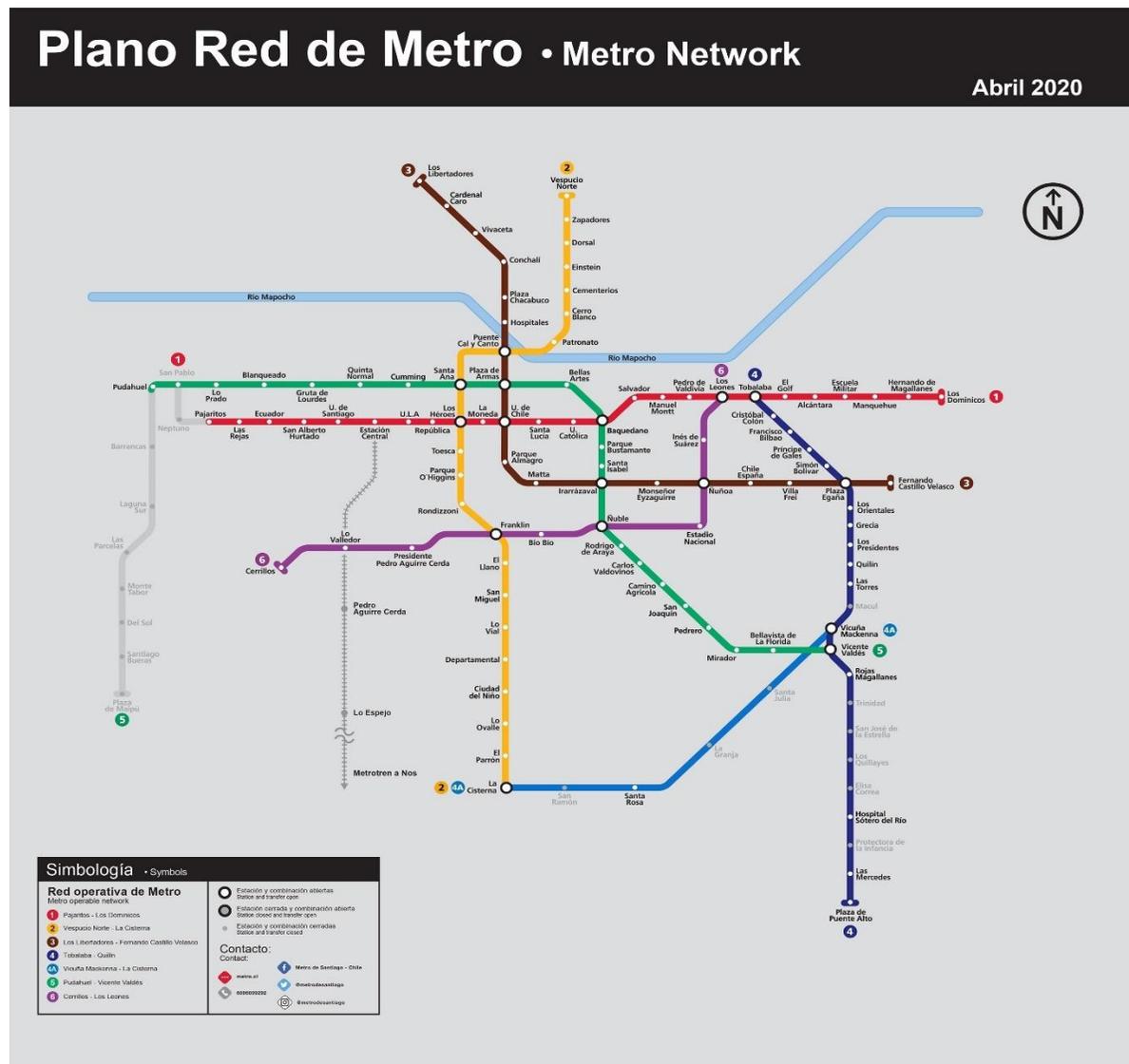
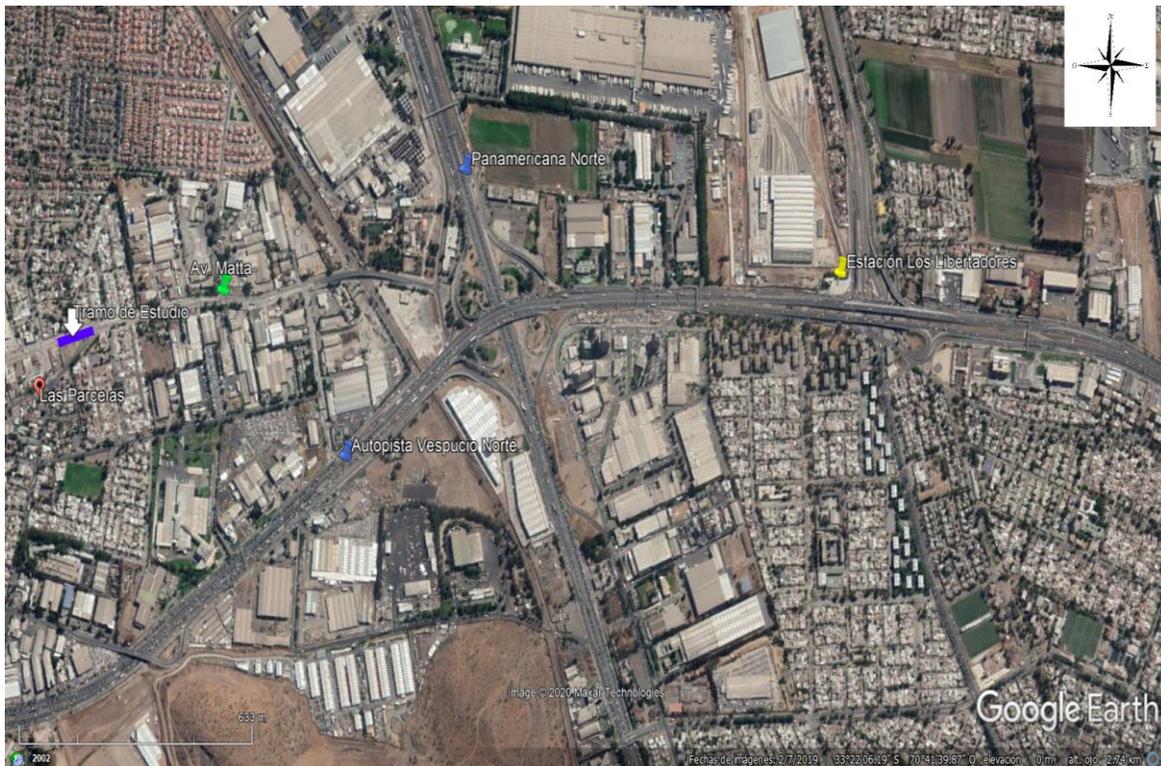


Figura 5. 1 Plano de Red de Metro de Santiago. (Metro, 2019)

La Figura 5. 3 muestra la zona a estudiar.



a)



b)

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

5.3. Propiedades y geometría del túnel

Los datos correspondientes a los túneles fueron proporcionados por Arcadis, que es la empresa de ingeniería de esta línea de Metro. Los datos se muestran en la Tabla 5. 2. Tal como se mencionó anteriormente se considera para efecto de este estudio solo el tramo recto de los túneles, es decir, con geometría túnel tipo T1-B.

Tabla 5. 2 Propiedades Geométricas del Túnel a estudiar. (ARCADIS, 2013)

Datos túnel		
Sección	T1-B	T5-B
Altura [m]	8.03	8.43
Ancho máximo [m]	10.0	10.4
Distancia entre cota de riel y la clave del túnel [m]	5.91	6.48
Distancia entre la cota de riel y la superficie [m]	18	15.09
Distancia entre eje trazado y eje central del túnel [m]	0.0	0.2

Los datos para dibujar³ el túnel tipo NATM en los programas de D.D.F.F.

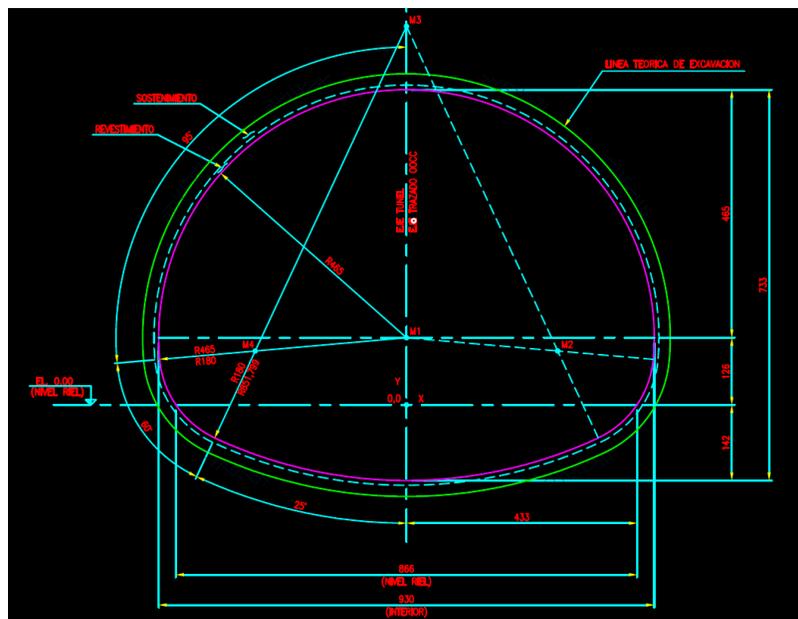


Figura 5. 4 Geometría del túnel a estudiar. (ARCADIS, 2013)

³ Para diseñar el túnel en programas de E.E.F.F. se puede dividir el túnel en sectores geométricos (con arcos o líneas rectas). En este caso se divide en 3 sectores circulares, cuyos centros se encuentran en los puntos M1, M2 y M3 respectivamente, de Radios y ángulos de abertura indicados en la Figura 5. 4.

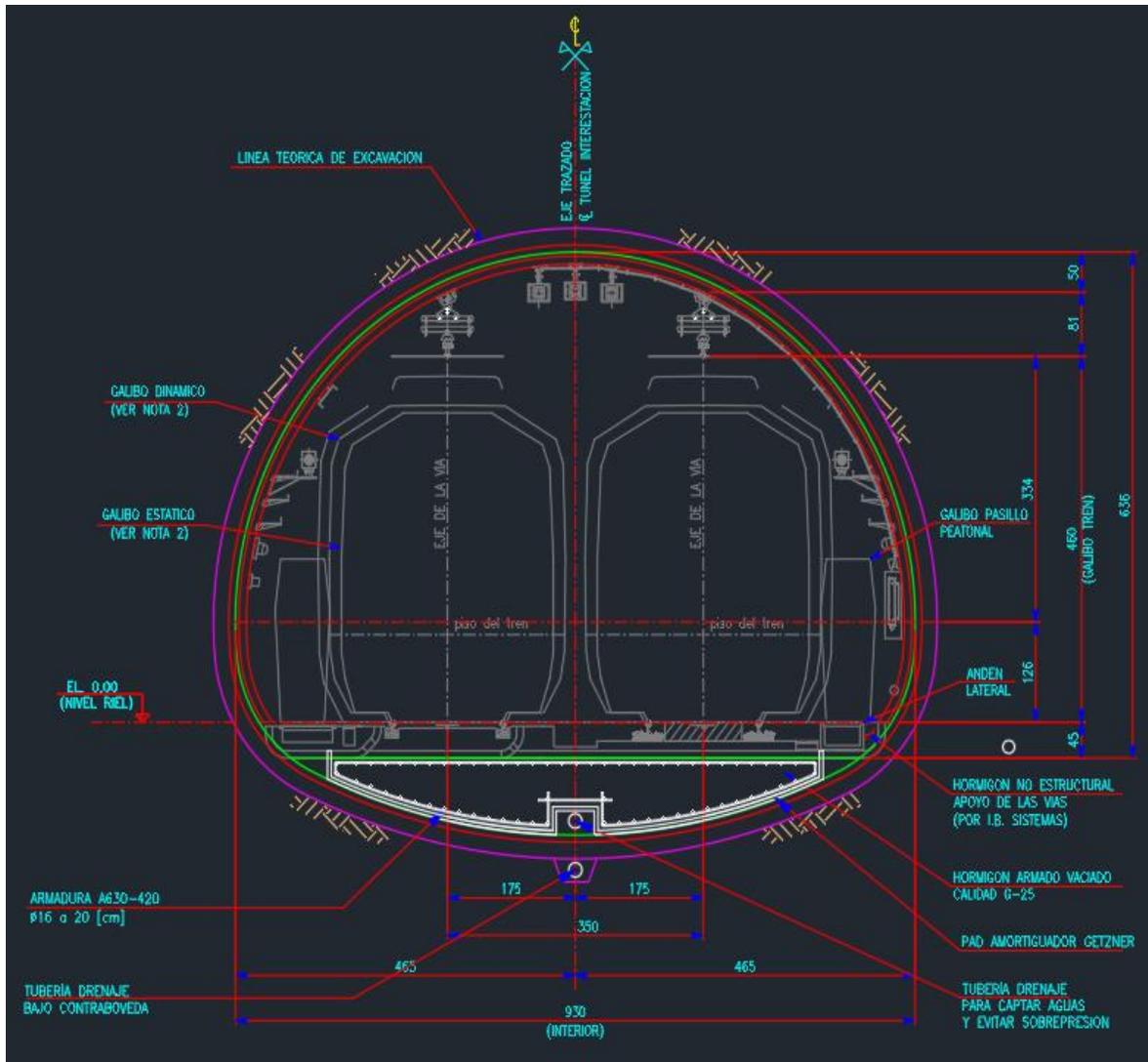


Figura 5. 5 Geometría del túnel, donde se muestran las estructuras de las vías, la manta elastomérica, los trenes, se muestran los rieles, trenes y los pantógrafos.

Además, las coordenadas de los puntos de origen se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. 3 Coordenadas de los puntos geométricos de secciones de túnel. (ARCADIS, 2013)

Coordenadas [cm]			Parámetros de sector circular	
Punto	X	Y	Radio [cm]	Ángulo abertura [°]
M1	0.0	126.0	465	95
M2	283.9	101.2	180	60
M3	0.0	710	851.8	25
M4	-283.9	101.2	180	60

Los elementos estructurales usados tanto en el revestimiento del túnel como en el sostenimiento fueron hechos mediante elementos de hormigón proyectado, acero estructural y mallas electrosoldadas. Las propiedades de ellos se muestran a continuación:

- Hormigón estructural: G25 o H30
- Mallas electrosoldadas: AT56-50H
- Acero de Refuerzo: A640-420H

Tabla 5. 4 Propiedades Mecánicas del hormigón estructural. (Layera, 2018)

Hormigón Estructural G25		
Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia a la compresión cilíndrica (28 días)	250	[kgf/cm ²]
	24,516.5	[kN/m ²]
Módulo de elasticidad	235,000	[kgf/cm ²]
	2,3045,510	[kN/m ²]
<i>Poisson</i>	0.15	[-]
Peso Específico	2.45	[tonf/m ³]
	24.0247	[kN/m ³]

Tabla 5. 5 Propiedades mecánicas del acero de las mallas electrosoldadas. (Layera, 2018)

Barras de acero y mallas electrosoldadas		
Resistencia a la tracción malla	5,000	[kgf/cm ²]
	490,330	[kN/m ²]
Resistencia a la tracción Barras	4,200	[kgf/cm ²]
	411,877.2	[kN/m ²]
Módulo de Elasticidad	2,100,000	[kgf/cm ²]
	205,938,600	[kN/m ²]
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.25	[-]

Tabla 5. 6 Propiedades Geométricas de elementos subestructuras de la vía. (ARCADIS, 2013)

Dimensiones Elementos Estructurales		
Revestimiento	0.25	m
Barras (diámetro)	0.016	m
Malla Electrosoldada		
Losa Radier (ancho máximo)	6.68	m
Losa Radier (alto máximo)	0.97	m
Losa Radier (alto mínimo)	0.29	m
Losa Radier (área)	50,500	cm ²
	5.05	m ²

5.4. Estratigrafía del lugar

La Figura 5. 6 muestra los suelos de la Región Metropolitana de Chile, donde el tramo en cuestión de la línea 3 se encuentra inserto en suelos finos de la zona Norponiente de Santiago.

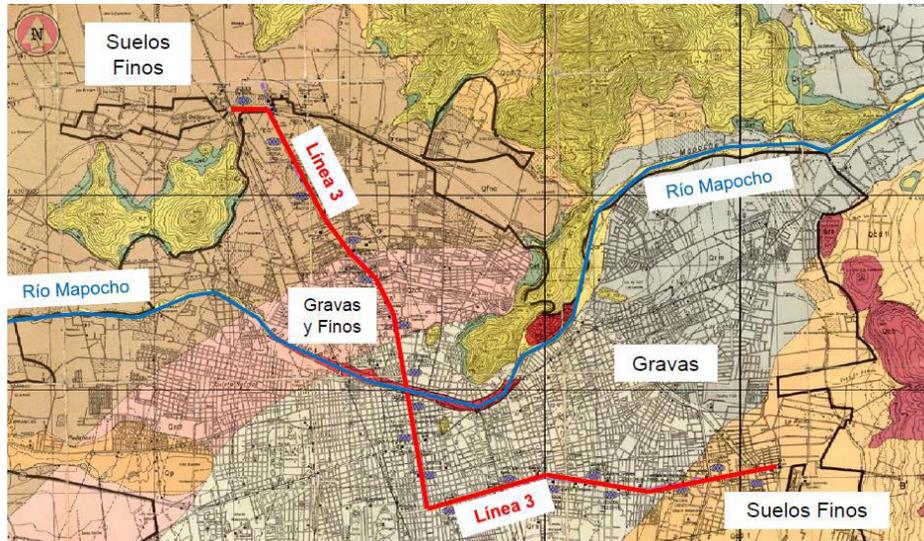


Figura 5. 6 Suelos de Santiago. (Valenzuela, 1978)

5.4.1. Propiedades Geotécnicas

Las propiedades geotécnicas fueron proporcionadas por Petrus basado en calicatas, además de ensayos in situ y de laboratorio. Estos valores se muestran en la Tabla 5. 7. En la etapa constructiva, sin embargo, se utilizan estos valores amplificados según los resultados del Back Analysis realizado por (Layera, 2018). Luego debido a que el análisis dinámico requiere una rigidización, los valores del módulo de Young (y por consiguiente el Módulo de corte, G y Bulk, K) fueron ponderados a 3 veces el valor original.

- La unidad 1: corresponden a rellenos artificiales de matriz limosa con basura y arcilla. Es un relleno de baja consistencia. En el sector de estudio llega a una profundidad de 5m con restos de pumicita y un poco de gravas.
- La unidad 2: corresponde al suelo donde se encuentra inmerso el túnel de estudio. Está compuesto por los suelos finos del norte, principalmente arcilla arenosas y limos de color café y consistencia alta.

Según la Tabla 5. 7 existe una variación lineal en profundidad del módulo de elasticidad del suelo, lo cual fue logrado en el modelo de Flac3D mediante el comando “Table” y una función para determinar el módulo respectivo. Esta función realiza una interpolación lineal en función de la coordenada vertical de la zona⁴. Se calculan los valores de los módulos de Elasticidad, de Corte y de Compresibilidad (“Bulk”) en los cambios de estratos y en la base del modelo. Para el suelo de la primera unidad⁵ debido que es constante no es necesario aplicar la función.

⁴ Zona se refiere a los elementos en los que se subdivide el modelo de estudio.

⁵ La profundidad de este estrato en el tramo de estudio corresponde solo a un metro.

Tabla 5. 7 Parámetros geotécnicos del tramo de estudio.

Unidad	1	Rellenos Artificiales
Parámetro	Valor	Unidad
Mod de deformación	150	ton/m2
Cohesión	1	ton/m2
Fricción	26	°
Peso unitario	1.85	ton/m3
Unidad	2	Suelos Finos
Parámetro	Valor	Unidad
Mod de deformación	$2000+275*z$	ton/m2 si z está en metros
Poisson	0.3	-
Dilatancia	0	-
Peso unitario	1.85	ton/m3
Empuje en reposo ($5 < z < 8$)	0.45	-
Empuje en reposo ($z > 8$)	0.65	-
Cohesión ($5 < z < 8$)	3	ton/m2
Cohesión ($z > 8$)	5.5	ton/m2
Fricción	31	°

Los parámetros geotécnicos finalmente usados en esta memoria debieron ser ponderados por ciertos factores, siguiendo la misma metodología que (Layera, 2018) para determinar que las curvas de asentamientos superficiales medidas coincidan con las obtenidas mediante el uso de Flac3D. Para esto se partió la calibración con el módulo de Young aumentado en un 20% y se obtuvo la siguiente curva de asentamientos a causa de la construcción:

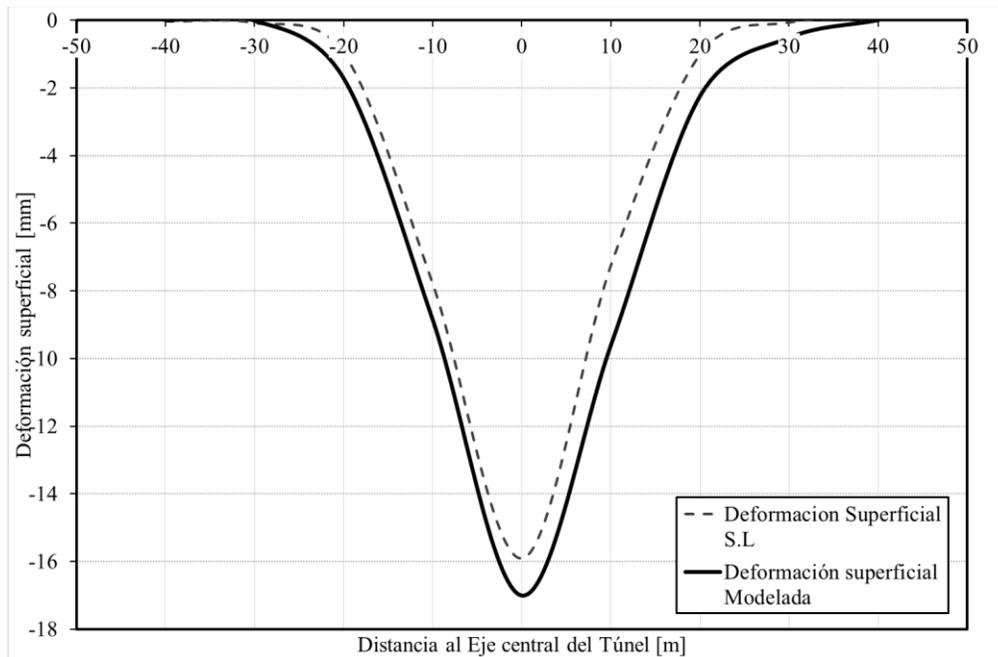


Figura 5. 7 Curva de asentamientos medidas en superficie (línea punteada) y curva modelada (línea continua). Deformaciones en [mm].

La diferencia que se observa en los resultados de Layera (Layera, 2018) y los obtenidos en este caso se debe a que para simplificar el estudio en la secuencia constructiva, se omitió el contrafuerte temporal, de modo que la secuencia constructiva está compuesta solamente de Bóveda y Contra bóveda, de modo que el área excavada es mayor que en el estudio de Layera. Existe una mayor deformación el lado norte (eje x positivo) debido a diferencias en el tamaño de los elementos, cuya diferencia no supera el 4%.

5.4. Antecedentes de los Trenes

5.4.1. Composición del tren

Las unidades de metro de las líneas 3 y 6 están compuestas por 5 carros identificados como S1-N1-N2-N1-S1 (Figura 5. 8), los cuales tiene estructuras muy similares entre sí y se unen mediante uniones semipermanentes. Cada uno de los coches está montado sobre dos bogíes y a su vez cada bogí, está montado sobre 2 ejes con dos ruedas cada uno. Todas estas uniones se logran mediante amortiguadores.

- Coches extremos (S1) poseen cabinas y se montan en bogíes remolques
- Coches intermedios (N1 y N2) no poseen cabinas y se montan en bogíes motores

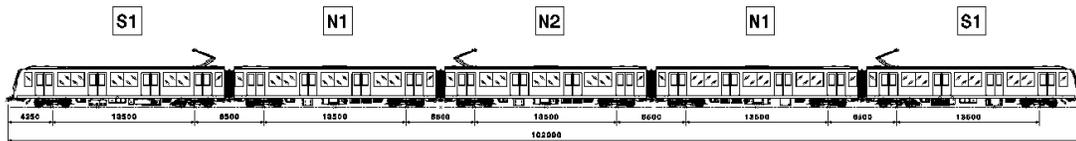


Figura 5. 8 Composición del Tren de las nuevas líneas 3 y 6 de Metro de Santiago. (CAF, 2015)

Donde:

- S1 es un coche extremo remolque con pantógrafo⁶.
- N1 es un coche intermedio motor sin pantógrafo.
- N2 es un coche intermedio motor con pantógrafo.

Peso de los carros sin equipos:

Tabla 5. 8 Peso de la caja de los carros sin equipos. Unidades en [kg] (CAF, 2015)

Peso [kg]	Carro S1	Carro N1	Carro N2
	16,912	14,995	15,195

Peso de los equipos:

Tabla 5. 9 Peso de los equipos de los carros. Unidades en [kg] (CAF, 2015).

Peso [kg]	Carro S1	Carro N1	Carro
	4,482	2,534	2,826

⁶ Pantógrafo: Sistema articulado de barras situado en el techo de las locomotoras eléctricas, usado para la toma de corriente de un conductor aéreo

Peso de los bogíes⁷:

Tabla 5. 10 Peso de los bogíes de los carros. Unidades en [kg] (CAF, 2015).

Peso [kg]	Carro S1	Carro N1	Carro N2
Bogí Delantero	5,623	7,322	7,322
Bogí Trasero	5,512	7,322	7,322

Con lo que se obtiene finalmente los pesos finales de los carros, además se agregan los pesos en diferentes condiciones de cargas.

Tabla 5. 11 Peso de los Carros completos en diferentes condiciones de carga. Unidades en [kg]. (CAF, 2015).

Estado de carga [kg]	Carro S1	Carro N1	Carro N2
TARA (0 pasajeros) AW0	32,529	32,173	32,665
Pasajeros sentados	35,119	34,973	35,465
Pasajeros sentados + 4 p/m ² (AW1)	45,281	45,247	45,739
Pasajeros sentados + 6 p/m ² (AW2)	50,362	45,247	45,739
Pasajeros sentados + 8 p/m ² (AW3)	55,362	55,521	56,013
Pasajeros sentados + 10 p/m ² (AW4)	60,525	60,657	61,149

Las dimensiones de las cajas de los carros S1, N1 y N2 son las mismas y se muestran a continuación:

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)

Dimensiones Caja		
Altura	3,200	[mm]
Largo Caja	22,000	[mm]
Distancia entre pivote	15,600	[mm]
Ancho máximo de caja	2,900	[mm]

Los valores de la suspensiones primaria y secundaria son los siguientes) (CAF, 2015):

Tabla 5. 13 Suspensión primaria y secundaria de los carros y contacto Hertziano

Suspensión	Simbología	Valor	Unidad
Hertziano ⁸	k0	1.4e6	[kN/m]
Primaria	k1	650,000	[kN/m]
Secundaria	k2	5,200	[kN/m]

⁷ Bogie: es un dispositivo giratorio dotados de dos o más ejes, cada uno con dos ruedas, sobre los que se apoya un vehículo ferroviario

⁸ Contacto entre rueda y el riel se modela como un resorte llamado Hertziano. El valor se obtuvo de la literatura (Melis, 2002)

5.4.2. Propiedades de la rueda

La rueda con la que se cuenta para los carros fue construida en base a la norma EN 13262 de Europa. En este caso corresponde a una rueda de Velo recto de acero ER8 según la norma previamente mencionada. Las características de la rueda se muestran en la siguiente tabla (RENFE, 2015):

Tabla 5. 14 Características de la rueda de los trenes de la línea 3 y 6. (ArcelorMittal, s.f.)

Matricula	Designación	Tipo de velo	Espesor de velo [mm]	Diámetro nominal [mm]	Máx. diferencia admisible entre diámetros [mm]	Diámetro máximo desgaste [mm]	Ancho de banda rodadura	Peso	Calidad acero
06800094	RUEDA DIAMETRO 890 MM CON SISTEMA DE INSONORIZACIÓN (CUBO INTERIOR 204 +0, -2 MM)	Recto con agujeros	35-15	890	≤ 0.3	790	135	378.2	ER8

Además, se agrega que la carga estática que soportará cada rueda es de 7,5 [tonf] la *rugosidad* del velo es de 12,5 [mm]. La calidad del acero corresponde a un acero ER8 (según norma EN 13262) la que equivale a un acero A360.

5.5. Antecedentes de la vía

Las vías de los túneles de todas las líneas del Metro de Santiago corresponden a una vía de doble sentido, donde los rieles se encuentran montados sobre losas y éstas (en las correspondientes a vías en túneles), apoyadas en el revestimiento. Las propiedades, tanto geométricas como mecánicas, de la losa de la subestructura se mostraron anteriormente en el apartado 5.3.

5.5.1. Riel

El riel que se utiliza actualmente en las vías del Metro de Santiago (L3 y L6) corresponden a UIC60, las características de éste se muestran a continuación

Tabla 5. 15 Información del riel en Línea 3 y 6. (ArcelorMittal, s.f.)

Tipo de Carril	Estándar	Dimensiones [mm]					Sección [cm ²]	Masa [kg/m]
		H	B	C	D	E		
UIC 60	EN-1374-1	172	150	72	51	16,5	76,7	60,21

Sin embargo, para hacer más sencillos los modelos y además de asegurar que las ondas viajen en los elementos estructurales, la sección anterior se modificó a una sección rectangular. La sección elegida mantiene el peso lineal del riel y, además, la inercia rotacional del riel con el fin de no modificar los resultados y cálculos posteriores.

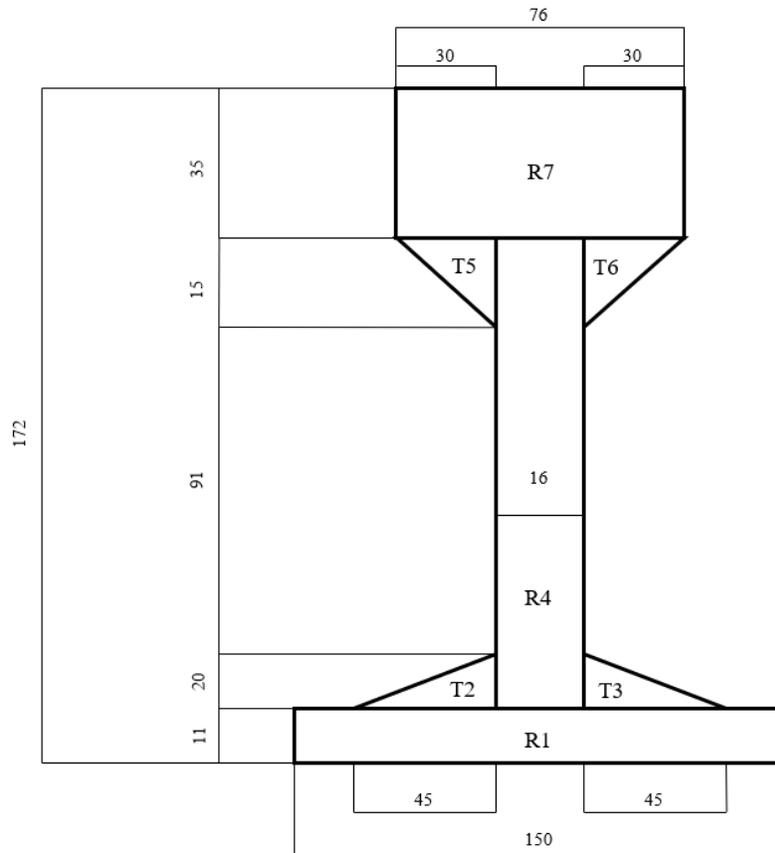


Figura 5. 9 Modelo simplificado de riel UIC60. Dimensiones en mm.

En la tabla siguiente se muestran los cálculos realizados para obtener el área equivalente.

Tabla 5. 16 Dimensiones, área e inercia del Riel UIC-60.

Elemento	b [m]	h [m]	Área _i [m ²]	Y _{CG} [m]	I [m ⁴]
R1	0.15	0.011	0.00165	0.0055	9.46622E-06
T2	0.045	0.02	0.00045	0.01767	1.81369E-06
T3	0.045	0.02	0.00045	0.01767	1.81369E-06
R4	0.016	0.126	0.002016	0.074	1.07668E-05
T5	0.03	0.015	0.000225	0.132	5.88567E-07
T6	0.03	0.015	0.000225	0.03	5.87508E-07
R7	0.076	0.035	0.00266	0.1545	1.54652E-05
H _{total} [m]	0.172	Área total	0.007676	Inercia total	4.05016E-05

Debido a que representar este tipo de riel en programas de cálculos es difícil, se transforma lo anterior a un riel de forma rectangular manteniendo la inercia, área y peso por metro lineal (densidad lineal). De este modo la sección equivalente corresponde a una sección rectangular de valores indicados a continuación.

Tabla 5. 17 Dimensiones de Sección equivalente a Riel UIC-60. Dimensiones en [mm].

Ancho [mm]	61.5
Alto [mm]	125
Área Original [mm ²]	7670
Área Nueva [mm ²]	7676
Inercia Original [mm ⁴]	40501642
Inercia Nueva [mm ⁴]	398481267
Densidad lineal Original [kg/m]	60.21
Densidad lineal Nueva [kg/m]	60.25

En este caso hay un aumento del área y de la densidad lineal que son despreciables, sin embargo, en lo que respecta a la inercia del modelo simplificado del riel, tiene una disminución cercana al 1.6%, lo que el autor de este trabajo considera despreciable.

Debido a que este elemento es de dimensiones muy pequeñas, los pasos de tiempo en los análisis dinámicos se vuelven muy pequeños, haciendo que los tiempos de cálculos crezcan. Este elemento fue omitido de la modelación, ya que, no interfieren en los resultados de los modelos (al ser una constante en ambos) y esta consideración mejora notablemente los tiempos de cálculo.

6. Modelo de estudio

6.1. Modelo dinámico del tren

La Figura 6. 1 muestra un modelo simplificado correspondiente al sistema dinámico de la rueda-riel. Este modelo en particular se usó para modelar el Metro de Madrid apoyado sobre durmientes o traviesas y balasto y es el que se usará para modelar las fuerzas de contacto entre las vías y las ruedas del Metro de la Línea 3 de Santiago, con la diferencia de que en el caso de este estudio bajo el riel se encuentra una losa de hormigón y bajo ésta, se encuentra el revestimiento y sostenimiento del túnel.

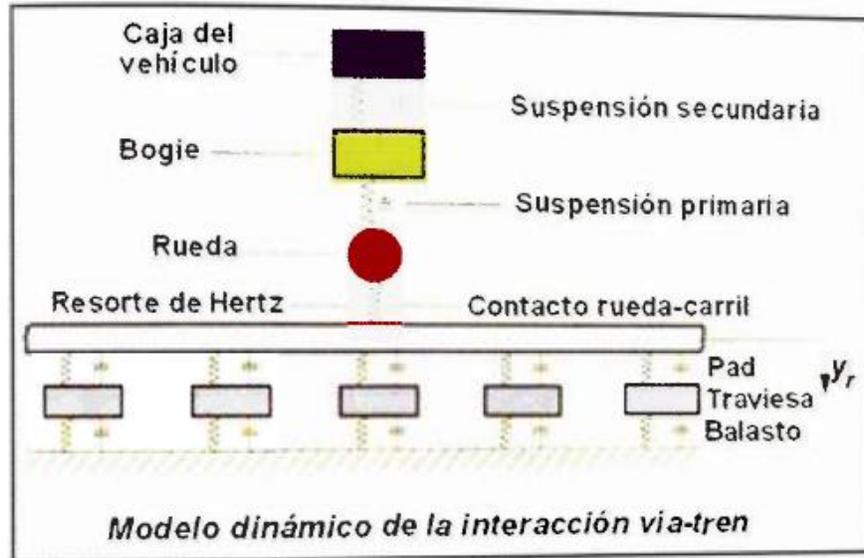


Figura 6. 1 Modelo simplificado de tren-vía. (Melis, 2002).

Para representar analíticamente las cargas dinámicas producidas por el paso del tren, se desarrollará un modelo dinámico tal como se muestra la Figura 6. 2. Este modelo corresponde a un sistema de 7 cuerpos con 7 GDL, todos ellos serán movimientos verticales del correspondiente grado de libertad, numerados desde v_1 hasta v_7 (se obviará los movimientos fuera del plano ya que están fuera del alcance de esta memoria y debido a que no se cuenta con valores de rigidez torsional). Las cargas basales o fuerzas de contacto (P_1, P_2, P_3 y P_4), por su parte, son producidas por un conjunto de irregularidades de diversas longitudes de onda y amplitud, tal como se explicará más adelante.

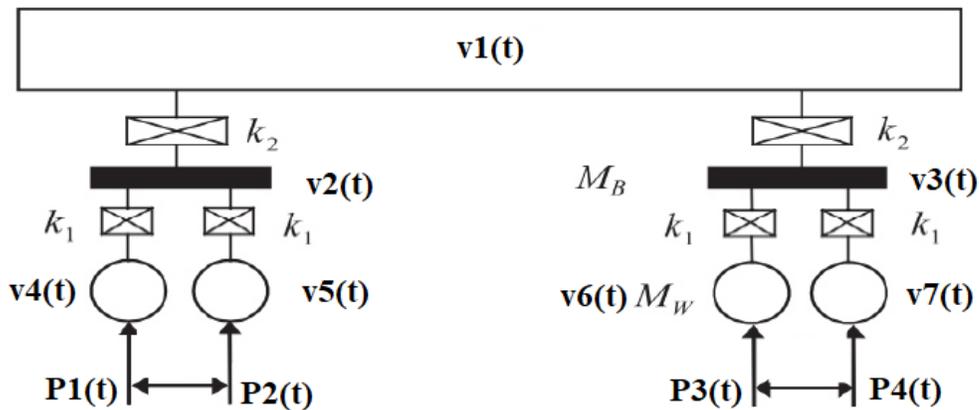


Figura 6. 2 Modelo Plano de Carro + bogí +ruedas y eje, suspensión primaria y secundaria para modelo analítico de carga dinámica. (CAF, INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO, 2015)

Donde los GDL corresponde a:

- $v1(t)$: Movimiento vertical Caja
- $v2(t)$: Movimiento vertical Bogí delantero
- $v3(t)$: Movimiento vertical Bogí Trasero
- $v4(t)$: Movimiento vertical 2 Ruedas + Eje delantero
- $v5(t)$: Movimiento vertical 2 Ruedas + Eje delantero
- $v6(t)$: Movimiento vertical 2 Ruedas + Eje trasero
- $v7(t)$: Movimiento vertical 2 Ruedas + Eje trasero

El peso de la caja será en condición de *Tara (AW0)* y *carga máxima (AW4)*, tal como se muestra en la Tabla 5. 11 y será analizado para los 3 tipos de carros en ambas condiciones de carga. Los pesos de los bogíes se muestran en la Tabla 5. 10, mientras que el peso de la rueda⁹ se muestra en la Tabla 5. 14. Los valores de los resortes para el modelo se muestran en la Tabla 5. 13.

Se realizará un análisis modal del sistema. Para ello, primero se deben obtener las frecuencias naturales del sistema de 7 GDL. Se muestran la matriz de rigidez y la matriz de masa necesarias para poder resolver el modelo, con esto las frecuencias naturales se muestran a continuación (Tabla 6. 1). Con estas matrices es posible obtener las frecuencias naturales y modos de vibraciones del sistema mediante los valores y vectores propios de la ecuación (6.1).

$$([K] - \omega^2 * [M])\{\phi\} = \{0\} \quad (6.1)$$

⁹ Se agregan los pesos de los ejes a las ruedas dependiendo del bogí usado, Eje Remolque (1500 kg), eje motor (1840 kg)

Matriz de Rigidez:

$$[K] = 2 * \begin{bmatrix} 2 * k_2 & -k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + 2k_1 & 0 & -k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_2 & 0 & k_2 + 2k_1 & 0 & 0 & -k_1 & -k_1 \\ 0 & -k_1 & 0 & k_1 + k_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & 0 & 0 & k_1 + k_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & k_1 + k_0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & k_1 + k_0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Masa:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{carro} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{bdelantero} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{btrasero} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{rueda} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{rueda} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{rueda} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{rueda} \end{bmatrix}$$

6.1.1. Frecuencias Naturales

Tabla 6. 1 Frecuencias Naturales de los carros para condiciones de carga Tara (AW0) y lleno (AW4). Unidades en [Hz].

Modo	S1		N1		N2	
	AW0	AW4	AW0	AW4	AW0	AW4
1	2.45	1.80	2.46	1.80	2.44	1.79
2	21.06	21.05	18.44	18.44	18.44	18.44
3	21.27	21.27	18.45	18.45	18.45	18.45
4	97.97	97.97	91.33	91.33	91.33	91.33
5	97.97	97.97	91.33	91.33	91.33	91.33
6	98.11	98.11	91.45	91.45	91.45	91.45
7	98.12	98.12	91.45	91.45	91.45	91.45

6.1.2. Amortiguamiento modal

La matriz de amortiguamiento modal es el modelo de amortiguamiento viscoso más usado y simple de incorporar en las ecuaciones de movimiento. Este amortiguamiento tiene la siguiente forma:

$$2\beta_i \omega_i \dot{y}_i(t) \quad (6.2)$$

Donde β_i es el factor de amortiguamiento modal del i ésimo modo, ω_i es la frecuencia natural de vibrar del i ésimo modo y finalmente \dot{y}_i es la velocidad de movimiento del i ésimo modo.

Para determinar la matriz de amortiguamiento se utiliza comúnmente la matriz de amortiguamiento modal Rayleigh, la cual es una matriz proporcional a tanto a la matriz de masa como a la matriz de rigidez del sistema, la ecuación (6.3) define la matriz de amortiguamiento modal de Rayleigh:

$$[C] = a_r [M] + b_r [K] \quad (6.3)$$

Entonces para relacionar el amortiguamiento viscoso de la ecuación 6.2 con la matriz de amortiguamiento de Rayleigh, se utiliza la siguiente relación para cada modo:

$$C_{m_i} = 2\beta_i\omega_i * M_{m_i} \quad (6.4)$$

Teniendo en cuenta que $\omega_i = \sqrt{\frac{K_{m_i}}{M_{m_i}}}$, deriva en la ecuación 6.4b y luego en la ecuación de amortiguamiento de cada modo (6.4c)

$$2\beta_i\omega_i * M_{m_i} = a_r * M_{m_i} + b_r * K_{m_i} \quad (6.4b)$$

$$\beta_i = \frac{a_r}{2*\omega_i} + \frac{b_r*\omega_i}{2} \quad (6.4c)$$

Debido a que no es posible determinar el amortiguamiento modal de manera analítica, se utiliza un valor conocido de amortiguamiento para un modo determinado, el cual es sacado de los informes¹⁰ y reemplazado en la ecuación 6.4c para determinar los coeficientes a_r y b_r . Los parámetros usados se muestran en la Tabla 6. 2, mientras que los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6. 3.

Tabla 6. 2 Amortiguamiento en % para distintas condiciones de carga.

Modo de vibración	AW0 S1	AW4 S1	AW0 N1 N2	AW4 N1 N2
	Amort. [%]	Amort. [%]	Amort. [%]	Amort. [%]
Vertical de caja	23.45	11.74	27.87	12.79
Vertical bogíes	31.77	24.43	24.97	19.01

Tabla 6. 3 Amortiguamiento de cada modo de los carros y para distintas condiciones de carga. Los valores estan en [%].

Modo de vibración	S1		N1		N2	
	AW0 [%]	AW4 [%]	AW0 [%]	AW4 [%]	AW0 [%]	AW4 [%]
1	32	24	25	19	25	19
2	23	12	28	13	28	13
3	23	12	28	13	28	13
4	93	45	124	55	124	55
5	93	45	124	55	124	55
6	93	45	124	55	124	55
7	93	45	124	55	124	55

¹⁰ 6En los informes entregados por CAF no se especifica ningún amortiguamiento del carro “N2” por lo que se asume que son iguales a los del carro “N1” debido a la similitud de ambos carros.

Tabla 6. 4 Componente predominante segun modo, tipo de carro y condición de carga

Modo de vibración	S1		N1		N2	
	AW0	AW4	AW0	AW4	AW0	AW4
1	Caja	Caja	Caja	Caja	Caja	Caja
2	Bogí Delantero					
3	Bogí Trasero					
4	Ruedas v_4 y v_5					
5	Ruedas v_4 y v_5					
6	Ruedas v_6 y v_7					
7	Ruedas v_6 y v_7					

6.1.3. Cargas basales

La ecuación de movimiento predominante en este sistema es la siguiente:

$$[M](\{\ddot{u}\} - \{\ddot{u}_g\}) + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (6.5a)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{\ddot{u}_g\} \quad (6.5b)$$

La ecuación 6.5b tiene soluciones conocidas debido a que el sistema se puede convertir en una de varias ecuaciones de movimiento de un grado de libertad según el número de grados de libertad que posea el sistema estudiado. En particular para este problema son de interés la solución del régimen permanente, las cuales se expresan según 6.6:

$$y_i(t) = \frac{P_{m_i}}{K_{m_i}} * D_{m_i} * \text{sen}(\Omega t - \psi_i) \quad (6.6)$$

Donde:

$$P_{m_i} = -\{L_{m_i}\} * u_{g0} * \Omega^2 * \text{sen}(\Omega t) \quad (6.7a)$$

$$\{L_{m_i}\} = [\phi]^T [M]\{r\} \quad (6.7b)$$

$$D_{m_i} = \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma_i^2)^2 + (2\beta_i\gamma_i)^2}} \quad (6.7c)$$

$$\psi_i = \arctan\left(\frac{2\beta_i\gamma_i}{1-\gamma_i^2}\right) \quad (6.7d)$$

$$\gamma_i = \frac{\Omega}{\omega_i} \quad (6.7e)$$

La ecuación 6.7a corresponde a la carga modal, que relaciona factor de participación modal (ecuación 6.7b) con el término u_{g0} que representa la amplitud de movimiento de la base. El término “ Ω ” corresponde a la frecuencia de carga. Mientras que $y_i(t)$ corresponde a la solución de cada modo. La relación de la ecuación 6.7d corresponde al desfase que tiene la carga, el término γ_i es la relación

entre la frecuencia de carga basal con la frecuencia natural del modo $i_{ésimo}$. Por ultimo el termino de la ecuación 6.7c corresponde a un factor de modificación de desplazamientos entre la base y el grado de libertad respectivo, en simples palabras, representa el movimiento generado en el GDL $i_{ésimo}$ debido al movimiento basal.

Para determinar las fuerzas de contacto (movimiento basal) se seguirá la norma ISO - 3590 (3590, 2005). En esta norma se especifica una serie de irregularidades de distintas amplitudes y longitudes de onda que actúan conjuntamente en la base de las ruedas (contacto rueda-riel), lo que produce las fuerzas de contacto en forma de movimientos ondulatorios (sinusoidales) verticales simulando irregularidades en los rieles. El nivel de rugosidad basal y longitud de onda de estas irregularidades están graficadas en la figura 6.3 (medidas en dB). Para determinar la amplitud de onda en metros se utiliza la fórmula:

$$L_r = 10 * \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 [dB] \quad (6.8)$$

Donde

L_r = es el nivel de rugosidad en dB

r = es la rugosidad en RMS

r_0 = es la rugosidad de referencia igual a $1\mu m$

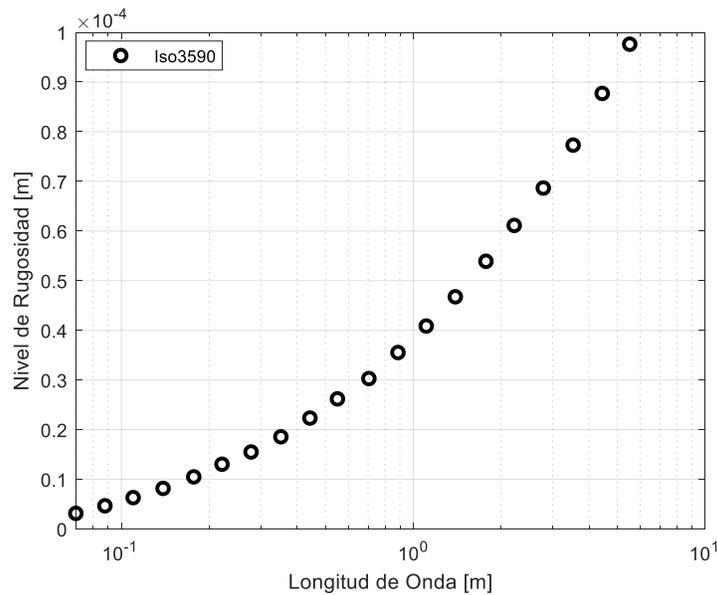


Figura 6. 3 Nivel de Rugosidad de las vías para distintas longitudes de onda. (3590, 2005)

Del gráfico anterior se puede obtener la frecuencia de carga de los rieles en las ruedas para distintas velocidades de circulación de los trenes sabiendo que la velocidad de onda es igual a la frecuencia multiplicada por la longitud de onda. Hay que tener en cuenta que la frecuencia obtenida de esta forma debe pasarse a frecuencia angular para poder formular correctamente la carga.

$$\Omega(t) = \omega_{carga_{i,j}}(t) = \frac{vel_i}{\lambda_j} * 2\pi, \quad i = 30, \dots, 80 \left[\frac{km}{h} \right] \quad (6.9)$$

Finalmente, la oscilación de la base, el movimiento basal y la carga ejerce una carga de forma sinusoidal se muestra en la ecuación 6.10a, 6.10b y 6.10c:

$$u_j(t) = u_{g_o} * \text{sen}(\omega_{carga_{i,j}} * t + \psi) \quad (6.10a)$$

$$\ddot{u}_{g_{oj}}(t) = -\omega_{carga_{i,j}}^2 * u_{g_{oj}} * \text{sen}(\omega_{carga_{i,j}} * t + \psi) \quad (6.10b)$$

$$p_{i,j}(t) = m * \ddot{u}_{g_{oj}} * \text{sen}(\omega_{carga_{i,j}} * t + \psi) \quad (6.10c)$$

Donde:

$p_{i,j}$ es la carga en el tiempo dada una longitud de onda "j" y una velocidad "i" [kgf].

$\omega_{i,j}$ =Frecuencia de carga dada una longitud de onda "j" y una velocidad "i" $\left[\frac{rad}{s^2}\right]$.

$u_{g_{oj}}$ =Amplitud de la oscilación dada una longitud de onda "j" [m].

ψ = Desfase de la carga que depende de la posición del centro de masa de las cajas de carro, de las ruedas y de los bogíes.

m = masa del elemento donde está actuando la aceleración[kg].

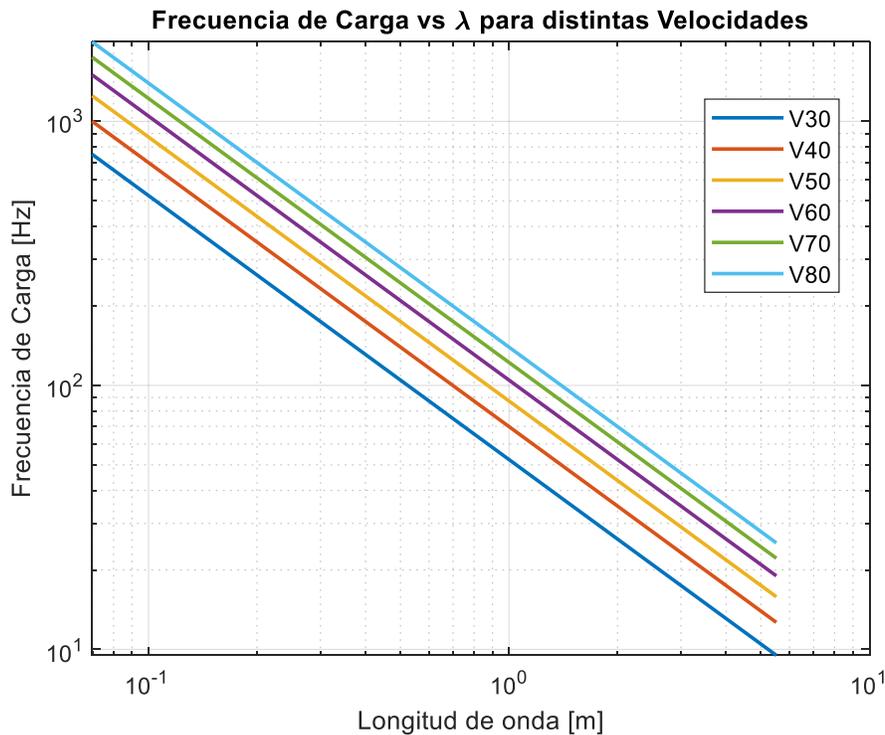


Figura 6. 4 Frecuencia de Carga vs Longitud de Onda para distintas velocidades. (Escala Logarítmica).

La frecuencia de carga se entiende como la razón que existe entre la velocidad de circulación que tendrá el tren y la longitud de onda de la oscilación (irregularidad en este caso) basal. Esto se muestra en la ecuación 6.11:

$$f_{carga_i} = \frac{\vec{v}_{tren}}{\lambda_i} \quad (6.11)$$

Donde

f_{carga_i} = es la frecuencia que tendrá la irregularidad "i". Unidades en [Hz].

\vec{v}_{tren} = es la velocidad de circulación del tren en $\left[\frac{m}{s}\right]$.

λ_i = Longitud de la irregularidad "i" [m].

La Figura 6. 4 muestra una tendencia clara de decaimiento en la frecuencia de carga a medida que aumenta la longitud de onda. Esta tendencia es similar independiente de la velocidad de circulación del tren. También es posible observar que la para una longitud de onda dada la frecuencia aumenta al transitar a mayor velocidad el tren, lo que resulta ser lógico debido a que las ruedas completarían una oscilación antes a medida que aumenta la velocidad. Por otro lado, la Figura 6. 5 muestra la aceleración basal obtenida según la ecuación 6.10b. Esta gráfica muestra un rango acotado de aceleraciones basales. El comportamiento de la aceleración es similar al descrito anteriormente, con la salvedad que, en la escala logarítmica, el comportamiento no tiene una tendencia lineal. Al aumentar la frecuencia de carga, al contrario de lo que se podría pensar, la aceleración basal disminuye, esto se debe a que la componente de la amplitud tiene mayor influencia que la frecuencia en el valor de la aceleración.

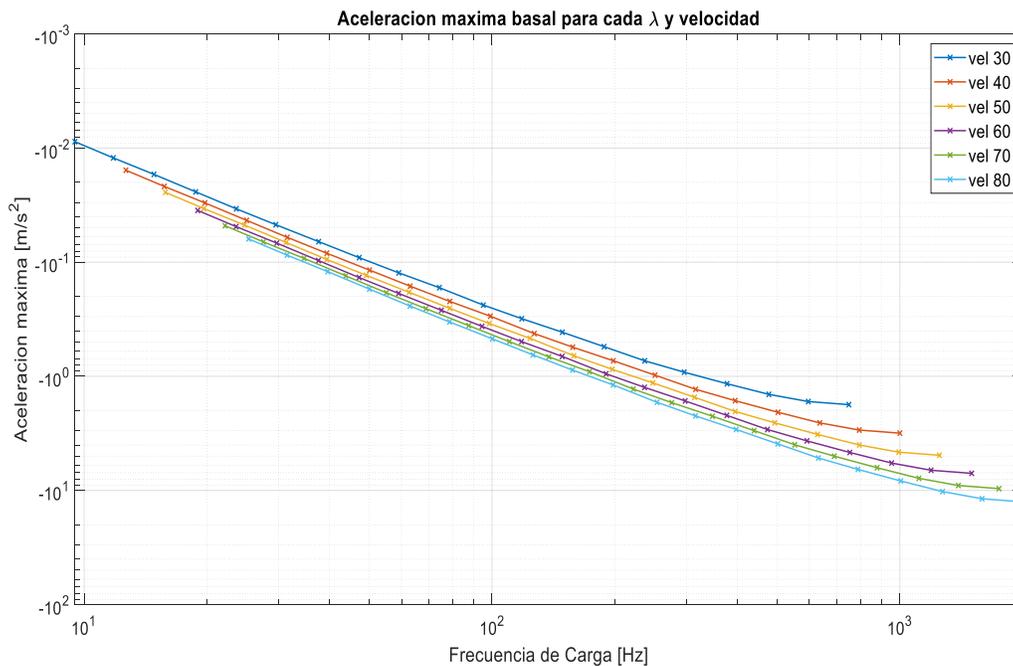


Figura 6. 5 Aceleración basal para distintas velocidades y longitudes de onda, obtenidas mediante la fórmula 6.2

6.1.4. Respuesta de desplazamientos y carga transmitida

Finalmente es posible obtener los desplazamientos de cada grado de libertad para cada carga basal, mediante superposición modal de los desplazamientos obtenidos con 6.6. Para determinar el movimiento $v(t)$ se utiliza la ecuación 6.12:

$$v(t) = [\phi] * \{y_i(t)\} \quad (6.12)$$

Una vez obtenido el movimiento de cada uno de los grados de libertad, es posible calcular las fuerzas de contacto que se producen entre la *rueda* y el *riel* para cada una de las irregularidades. Debido a que el contacto es modelado como un resorte Hertziano¹¹, la fuerza es determinada como un movimiento relativo entre las ruedas y el movimiento basal vertical de los rieles (ecuación 6.13) multiplicado por la constante Hertziana, k_0 . Se utiliza el principio de superposición lineal para obtener la carga ejercida por todas las irregularidades basales. Se debe tener en cuenta el desfase que existe en los grados de libertad debido a la posición de cada rueda en el tren.

$$F_{contacto}(t) = k_0 * (u_g(t) - v_{rueda}(t)) \quad (6.13)$$

6.1.5. Carga en el espacio del tiempo

Desde la Figura 6. 6 a la Figura 6. 11 se muestra la señal modelada para cada grado de libertad en función de las velocidades de circulación. El comportamiento de la carga es similar en todos los casos, independiente de la velocidad, donde esta afecta principalmente en el valor pico de la carga. Además, también es apreciable que a partir de los 60 [Km/h] la carga tiende a valores levemente mayores.

La carga que ejercen las cajas de los carros y los bogíes son muy bajas en comparación con lo que transmiten las ruedas, esto conversa muy bien con lo postulado en la literatura acerca de las vibraciones (Fernandez, 2014) (Melis, 2002), que postulan que más del 95% de las vibraciones son producidas por las ruedas. Se debe principalmente a la suspensión primaria y secundaria que sostiene las cajas y los bogíes, así la energía de los movimientos de estos componentes es absorbida por las suspensiones. Esto lleva a que modelos más sencillos pueden usarse sin mayores diferencias a la realidad para determinar las vibraciones provocadas por el tráfico de trenes.

Sin embargo, también cabe destacar que la magnitud de las fuerzas que ejercen las cajas y bogíes aumenta con la velocidad. Al transitar más rápido un tren la frecuencia de la irregularidad aumenta, así al obtener la aceleración derivando dos veces el movimiento del GDL esta dependerá directamente de ω_{carga}^2 .

¹¹Según Melis (Melis, 2002)

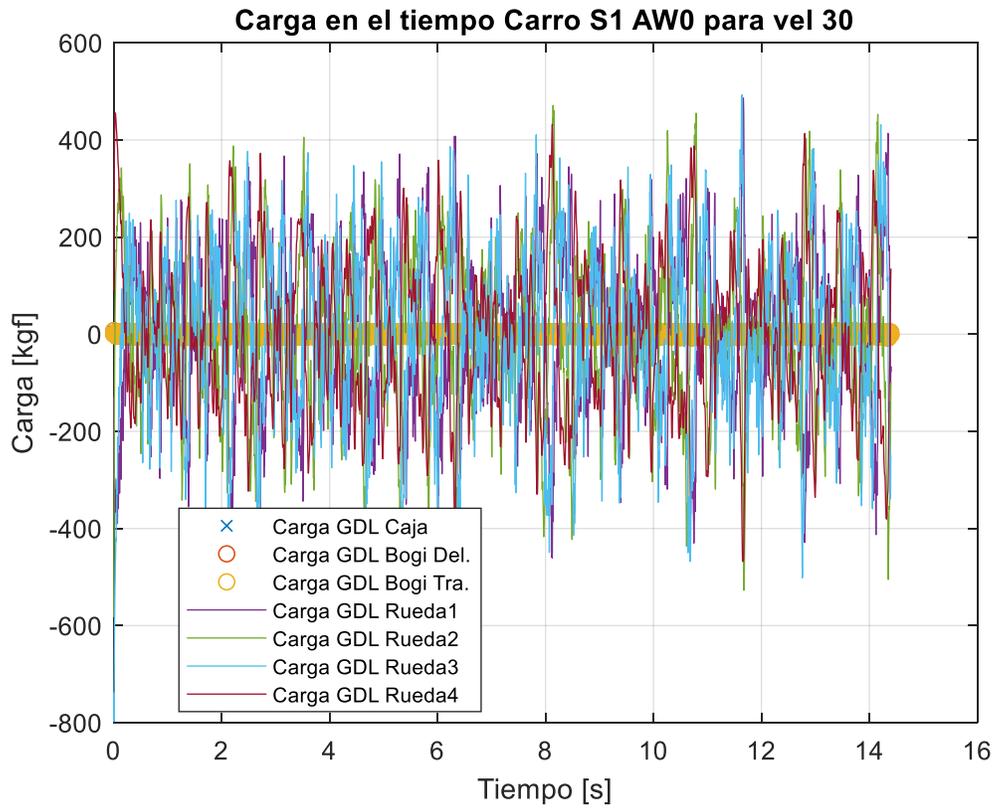


Figura 6. 6 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 30 [Km/h].

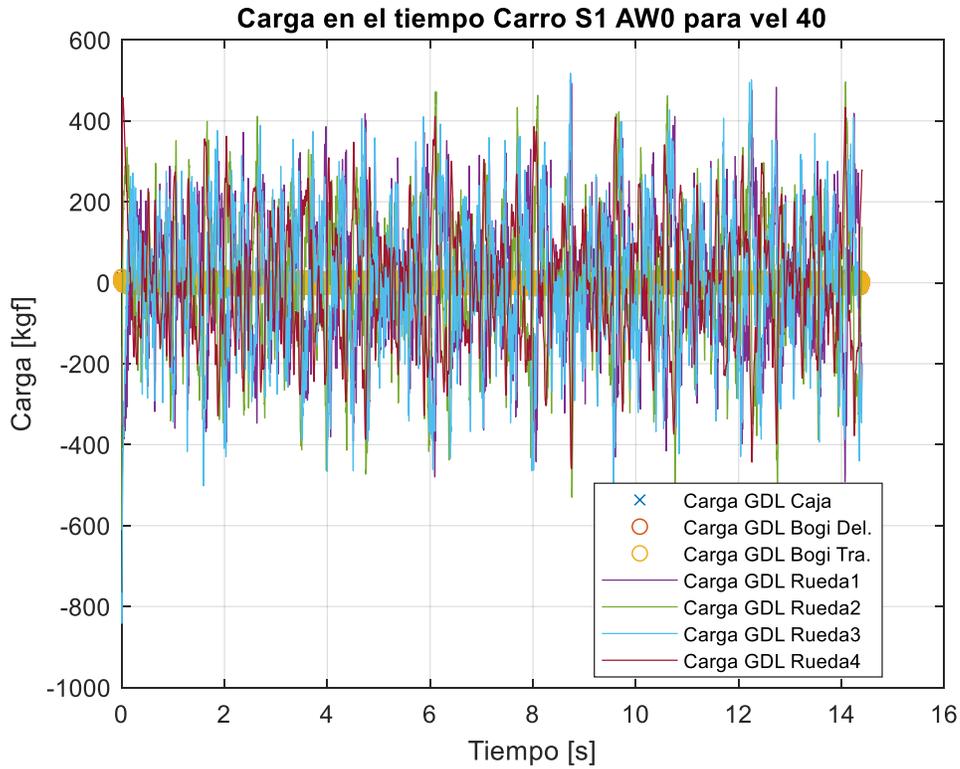


Figura 6. 7 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 40 [Km/h].

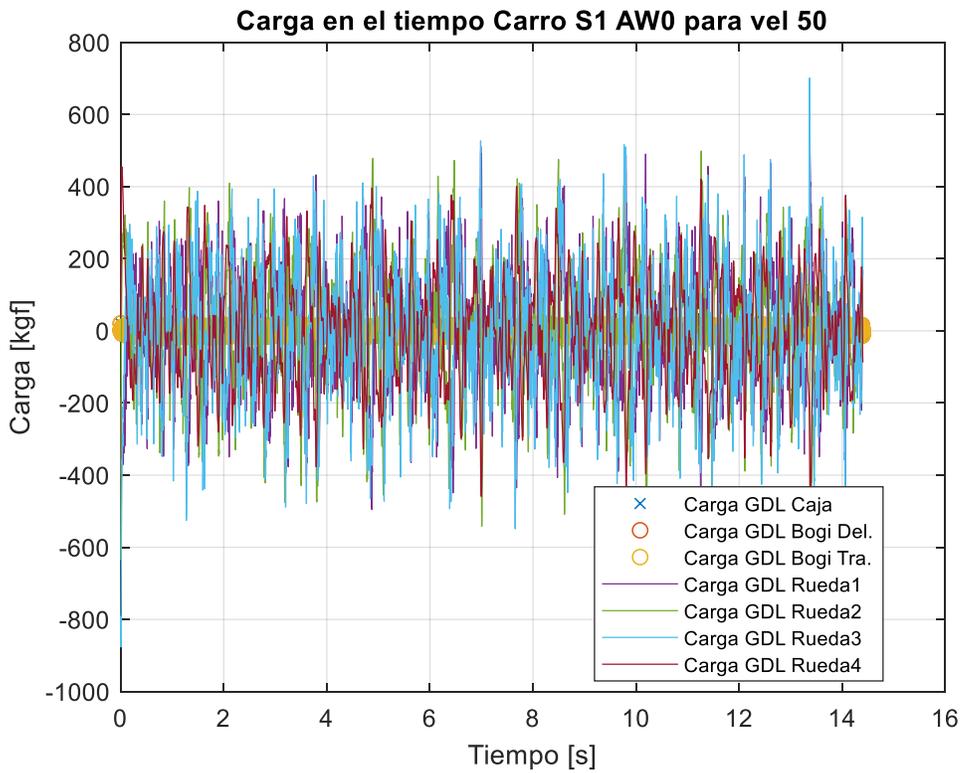


Figura 6. 8 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 50 [Km/h].

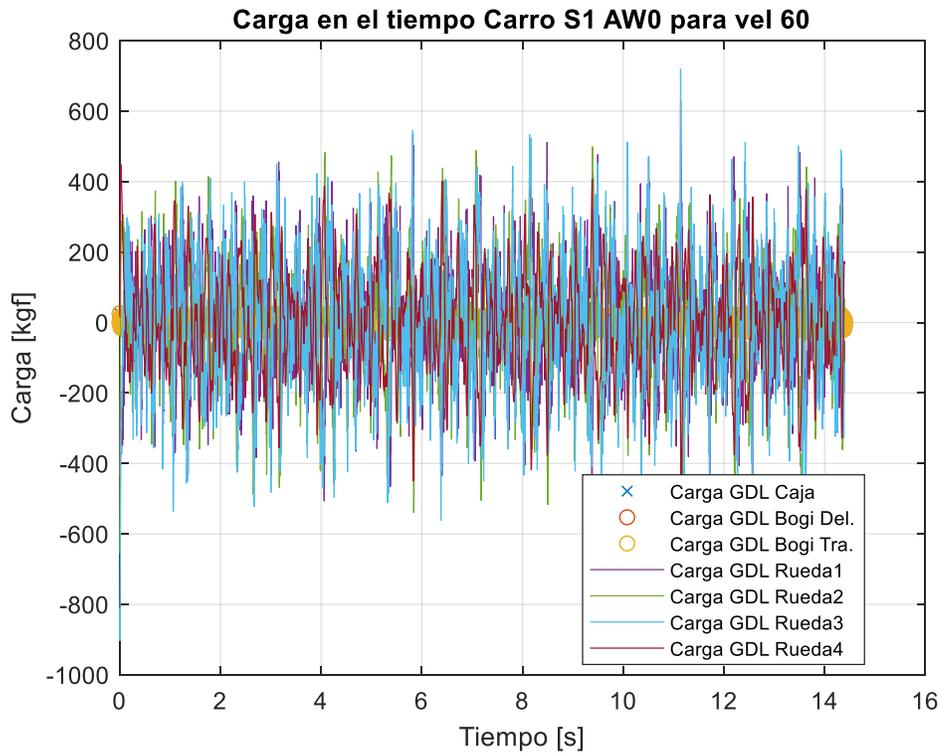


Figura 6. 9 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 60 [Km/h].

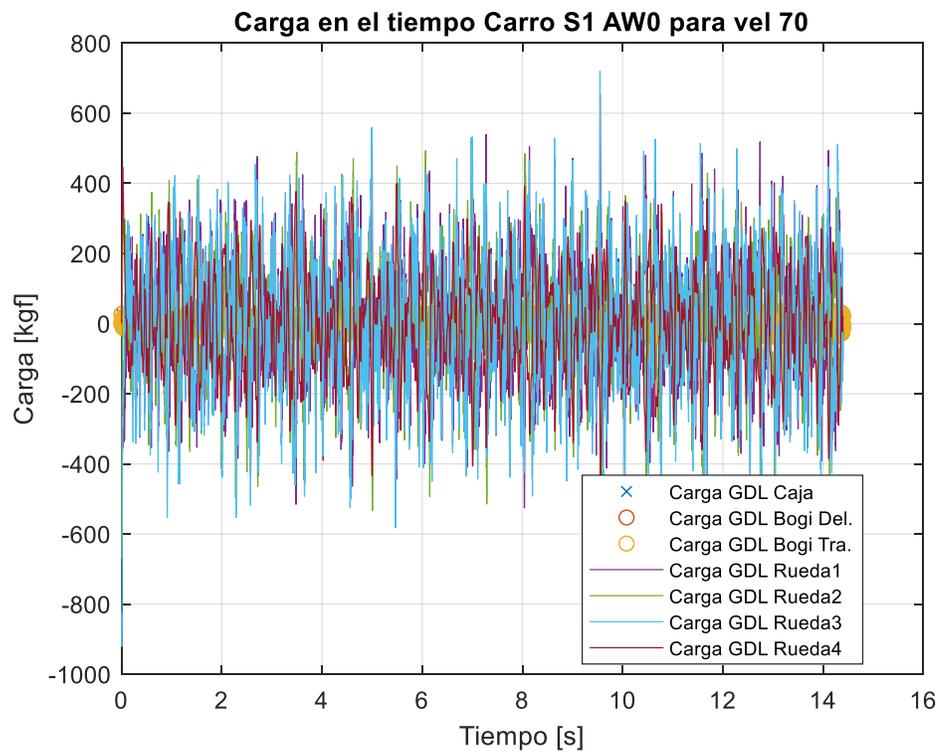


Figura 6. 10 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 70 [Km/h].

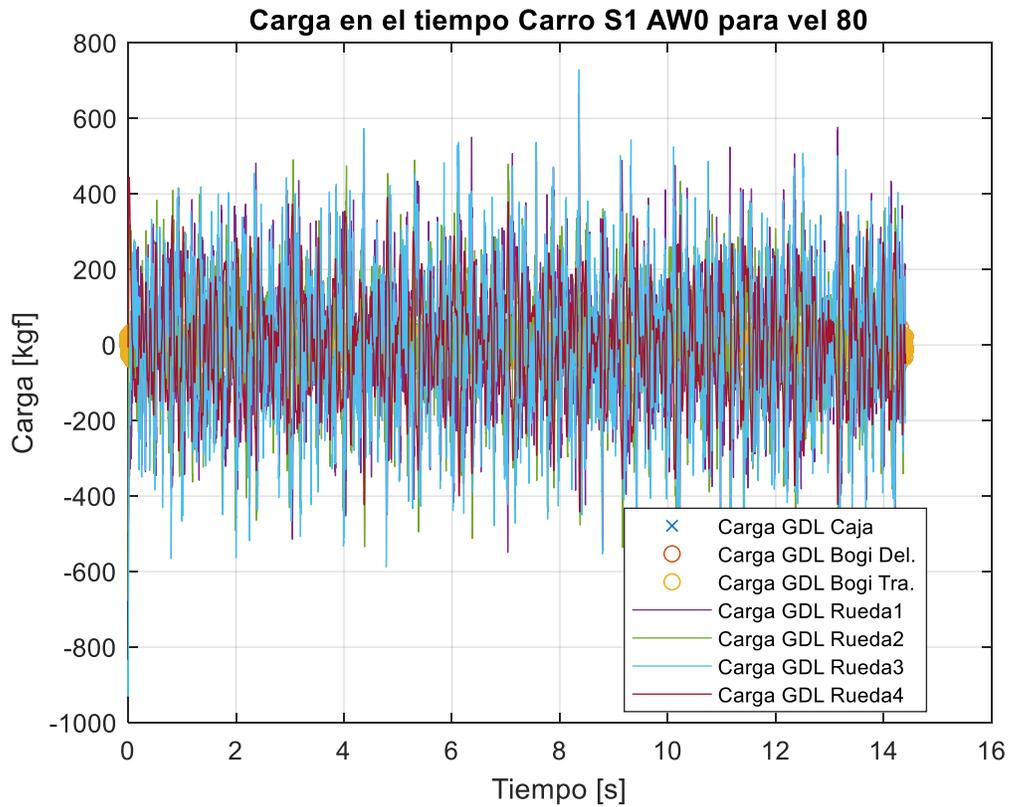


Figura 6. 11 Carga de contacto rueda-riel en el tiempo provocada por cada GDL para una velocidad de 80 [Km/h].

6.1.6. Carga en el espacio de las Frecuencias

Se calcula la transformada de Fourier de las señales de carga en el tiempo para poder estudiar las frecuencias dominantes de las cargas anteriormente calculadas. Esto se realiza para cada uno de los carros estudiados y para cada una de las velocidades en estudio. Debido al costo computacional solo se estudiará el caso en que el tren circule a la velocidad máxima de 80 Km/h a través del túnel, esto se argumenta también en que es la velocidad de operación del tren y el caso más desfavorable, provocando más carga que a velocidades bajas, además de optimizar el tiempo de cálculo ya que el tren recorrerá el tramo en menor tiempo.

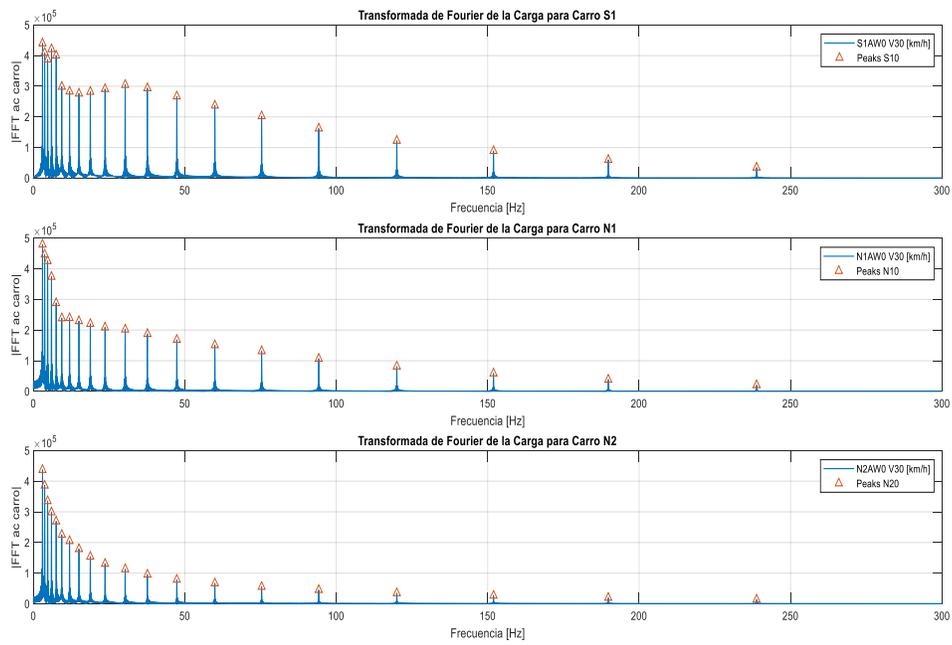


Figura 6. 12 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 30 [Km/h].

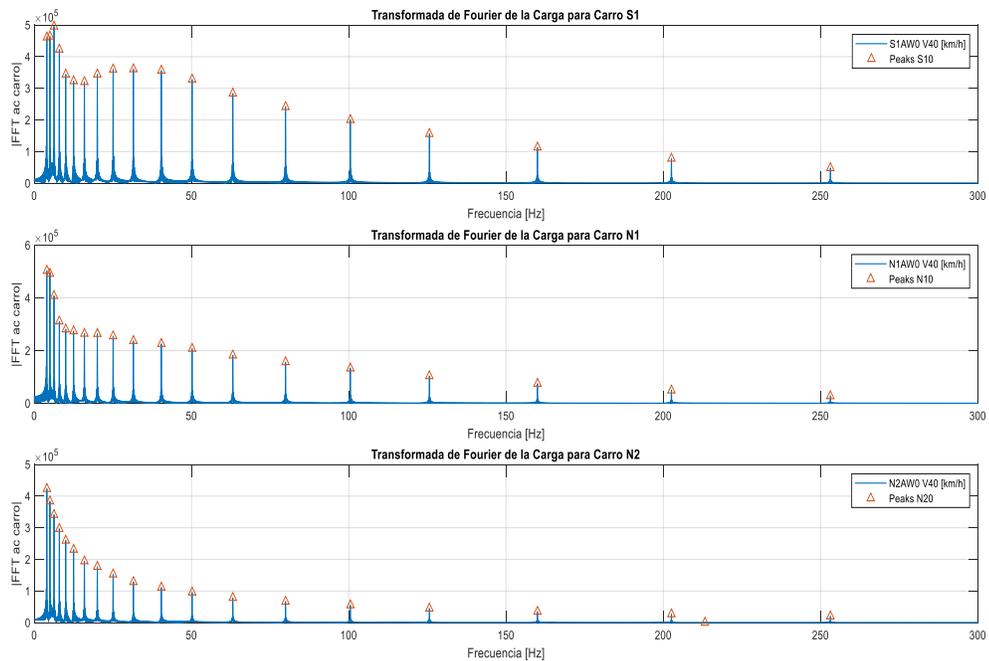


Figura 6. 13 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 40 [Km/h].

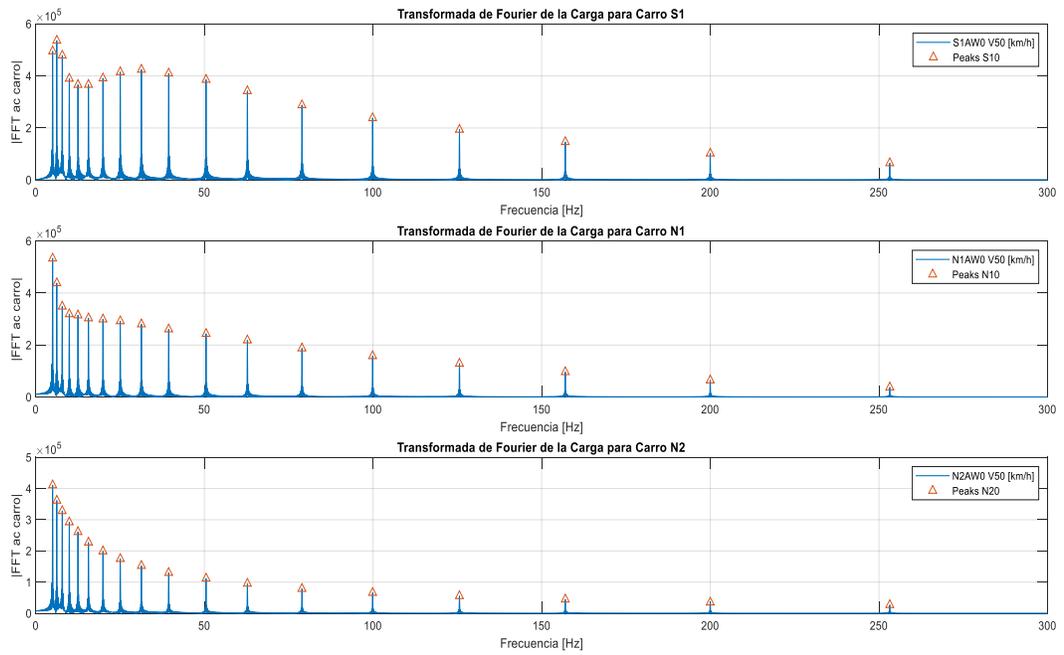


Figura 6. 14 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 50 [Km/h].

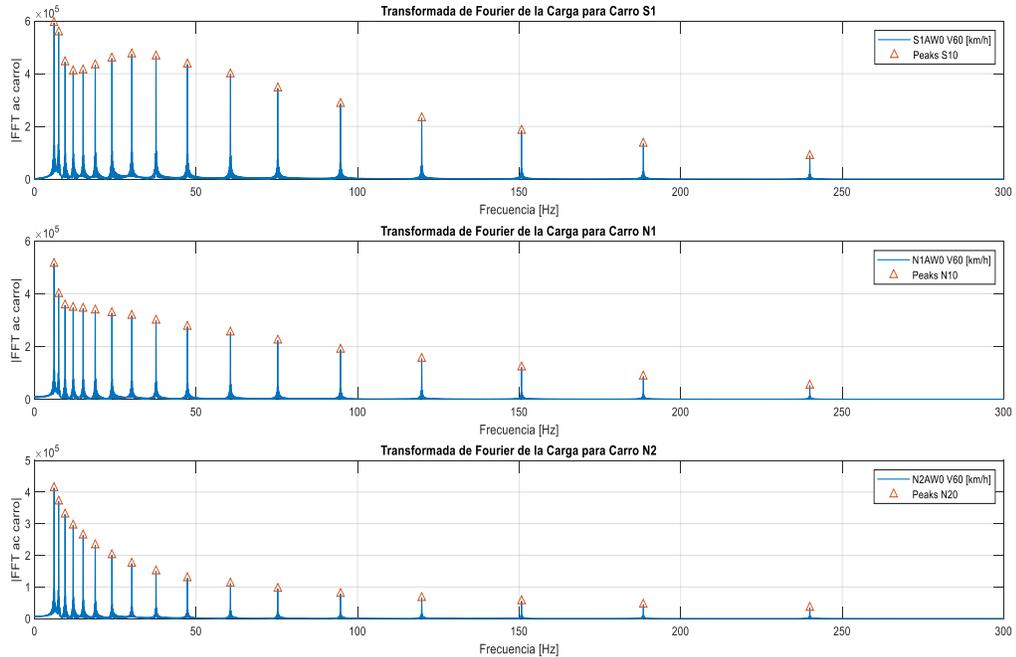


Figura 6. 15 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 60 [Km/h].

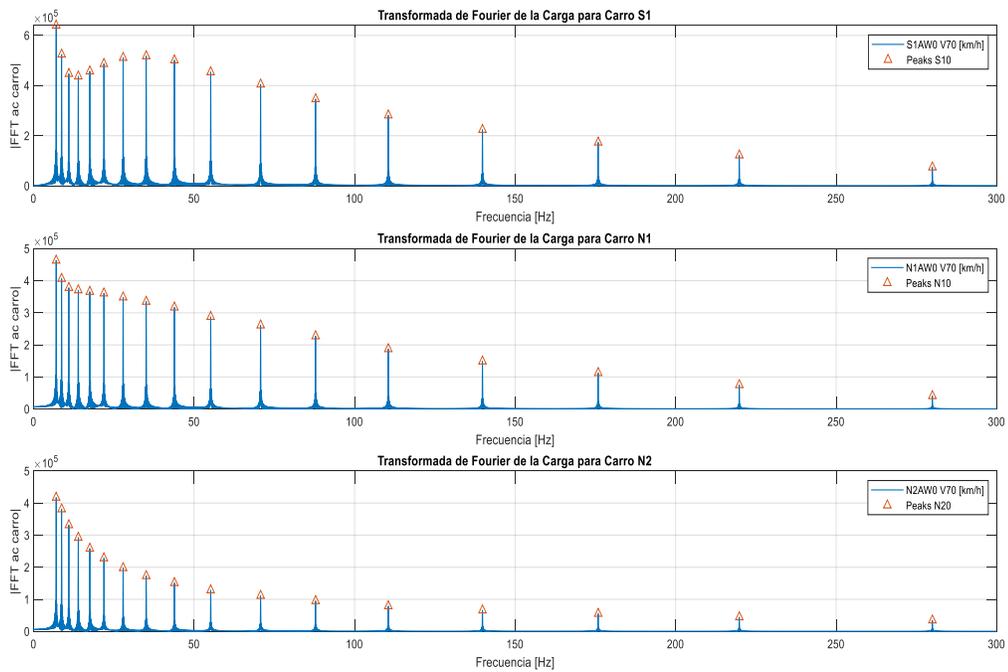


Figura 6. 16 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 70 [Km/h].

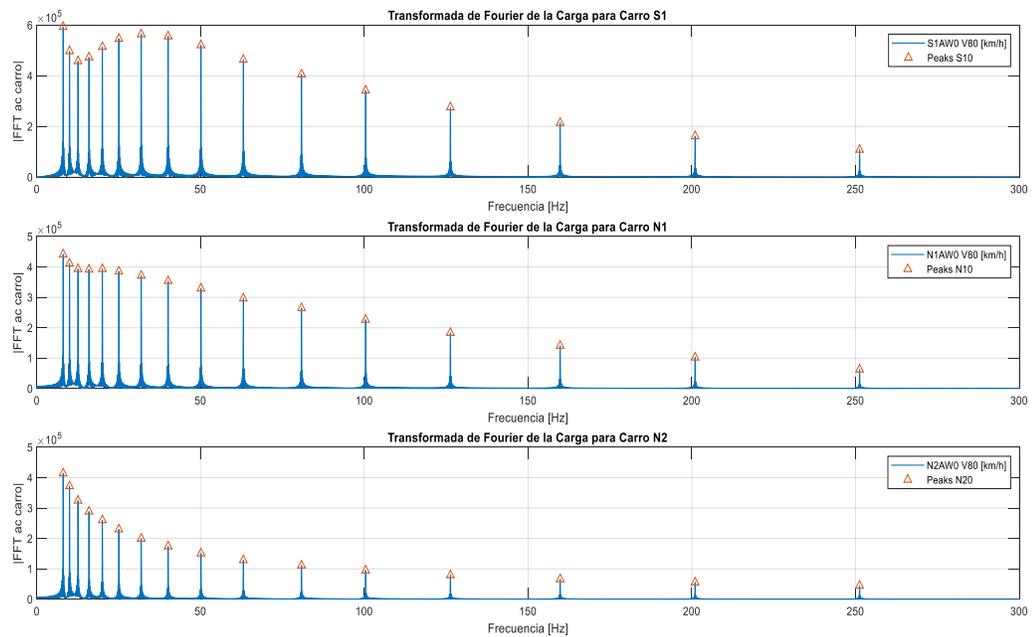


Figura 6. 17 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para cada uno de los carros, en condicion de TARA (AW0) para una velocidad de 80 [Km/h].

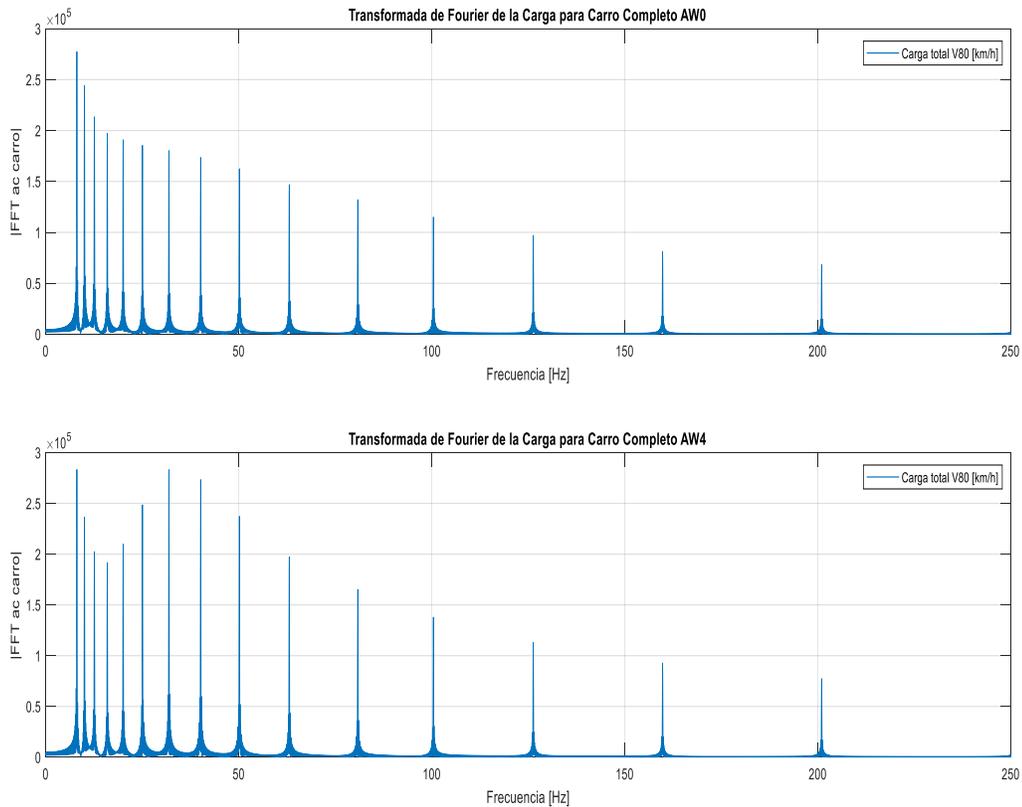


Figura 6. 18 Transformada de Fourier de la carga de contacto rueda-riel para el carro completo en condicion AW0 (arriba) y en condicion AW4 (abajo) para una velocidad de circulación igual a 80 [Km/h].

Finalmente se calcula la fuerza de contacto entre la rueda y el riel superponiendo los carros S1, N1 (dos veces) y el carro N2, teniendo en cuenta la posición que tiene cada carro y sus componentes, y por lo tanto su desfase en la aplicación de la carga. Esto se realiza para obtener la carga completa del tren. Su análisis espectral de frecuencias se muestra en la Figura 6. 18.

Tal como muestra la Figura 6. 18 la relación que tiene la energía de la onda tanto en condición de carga, como en condición de tara poseen niveles similares, sin embargo, hay una mayor ponderación para frecuencias medias en el caso del carro lleno, en cambio la energía del caso de condición de Tara, la energía disminuye a medida que aumenta la frecuencia de la carga. Otra cosa que cabe mencionar es que no hay variaciones en las frecuencias de carga para ninguna de las dos condiciones, esto se debe a que las suspensiones del tren aíslan de buena manera las vibraciones que produce la caja, de modo que el peso de esta solo influirá en las condiciones estáticas y no dinámica.

Para corroborar que los resultados obtenidos están correctos se comparan las frecuencias de carga con el modelo analítico recién expuesto con los resultados que se muestran en el informe entregado por CAF a Metro (CAF, INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO, 2015). Esto se muestra en la Tabla 6. 5

Al observar las frecuencias obtenidas se puede asumir que los resultados están correctos y las diferencias corresponden principalmente a la longitud de onda considerada, ya que éstas se obtuvieron mediante la digitalización de estos valores a través de un sitio web (Web Plot Digitizer, s.f.), lo que

no está excepto de errores. Además, el hecho de que se encuentren en escala logarítmica estos errores puede ser magnificados. Sin embargo, como se puede apreciar las diferencias son aceptables.

Tabla 6. 5 Frecuencias de carga de fuerza de contacto. Unidades en Hz

Frecuencia del informe ¹²	Frecuencia obtenida
6.3	-
8	8.1
10	10
12.5	12.6
16	15.96
20	20
25	25.1
31.5	32
40	40.1
50	50.2
63	63.1
80	80.1
100	100.4
125	126.3
160	159.8
200	201
250	251.2
315	320

6.2. Modelo Flac3D

Tal como se explica en la memoria titulada “*Back Analysis del modelo numérico utilizado para el diseño de los túneles Inter estación de la Línea3 del Metro de Santiago*” (Layera, 2018) la malla de estudio fue creado mediante archivos de AutoCAD y los programas Phase 2 y F2F. Estos programas permiten la creación del modelo y realizar su mallado de forma automática. El mallado utilizado en este estudio se muestra en la Figura 6. 19.

¹²Informe de cálculo de densidad de fuerzas de contacto (CAF, INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO, 2015)

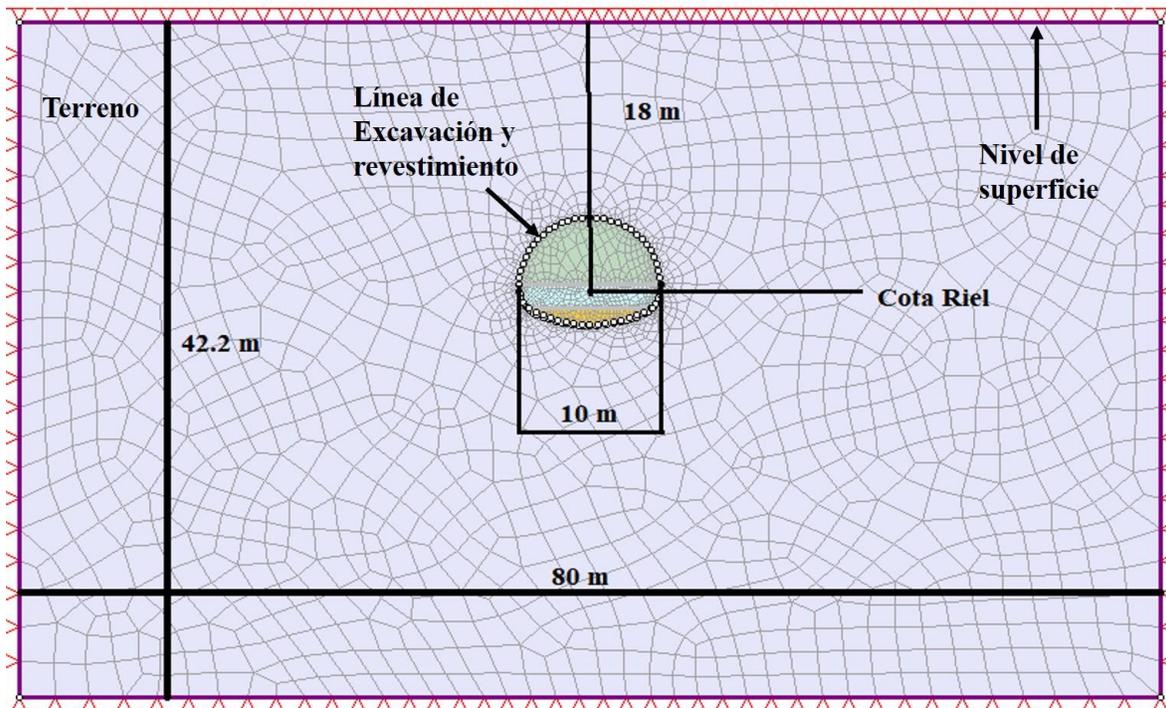


Figura 6. 19 Modelo de estudio, Phase 2.

Se debe tener especial cuidado con el tamaño de los elementos que se crean, sobre todo cuando se tratan de elementos tan pequeños. Si bien el tamaño del elemento no se puede controlar con el programa Phase 2, éstos se pueden ajustar mediante el comando de Flac3D “*generate zone density maxlength*”. Este comando permite determinar el tamaño máximo de los elementos finitos en cualquier dirección que se desee. El análisis dinámico también limita el tamaño del elemento para asegurar la correcta transmisión de las ondas. Según Kuhlemeyer and Lysmer (1973) muestran que, para la correcta transmisión de las ondas, el tamaño del elemento espacial, Δl , debe ser 1/10 a 1/8 de la longitud de onda asociada a la mayor frecuencia que se quiere estudiar:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (6.14)$$

Si la señal tiene frecuencias mayores a las que se desea estudiar y las que permite la ecuación 6. 14, la señal original debe ser filtrada, lo que permite un mallado más amplio, permitiendo optimizar los tiempos de cálculos. La Tabla 6. 6Tabla 6. 1 muestra el tamaño máximo que se debe utilizar en función de la frecuencia. La velocidad de onda de corte usada para obtener la frecuencia asociada a dicha longitud de onda se obtiene de un estudio hecho por Cristian Godoy, Lenart González y Esteban Sáez (Godoy, González, & Sáez, 2015), cuyos valores se muestran en la Tabla 6. 7. Dado que el valor de V_s es una estimación, se utilizará el valor de V_{s30} ¹³ para determinar el tamaño del elemento, además de ser un valor menor, lo que limita aún más la dimensión del elemento.

¹³ Se calcula la velocidad de compresión en función de la velocidad de onda de corte mostrada en la publicación.

Tabla 6. 6 Frecuencia de la onda de carga, longitud de onda asociada y tamaño máximo del elemento para el modelado.

Frecuencia [Hz]	λ [m]	Δl [m]
8	84.2	10.52
10	67.3	8.42
12.5	53.9	6.73
16	42.1	5.26
20	33.7	4.21
25	26.9	3.37
31.5	21.4	2.67
40	16.8	2.10
50	13.5	1.68
63	10.7	1.34
80	8.4	1.05
100	6.7	0.84
125	5.4	0.67
160	4.2	0.53
200	3.4	0.42
250	2.7	0.34
315	2.1	0.27

Tabla 6. 7 Resumen de las propiedades del perfil de Quilicura. Modificado de (Godoy, González, & Sáez, 2015).

Perfil	T_o [s]	V_s [m/s]	V_{s30} [m/s]	H [m]
Quilicura	1	445 ¹⁴	360	125

Para determinar la influencia del tamaño del elemento y el amortiguamiento del suelo se ejecutan cuatro modelos simplificados, de un metro de longitud (a modo de optimizar el tiempo de cálculo) y se estudian las diferencias encontradas. Los cuatro modelos se resumen a continuación:

Tabla 6. 8 Modelos de estudio de influencia del tamaño del elemento y amortiguamiento.

Modelo	Tamaño máximo de elemento [m]	Frecuencia máxima de estudio [Hz]	Longitud del Túnel [m]	Condiciones de Borde	Amortiguamiento [%]
Mallado Fino	1.3	63	1	Campo libre en las caras del modelo y Bordes absorbentes en la base	2
Mallado No Fino1	3	25	1	Campo libre en las caras del modelo y	2

¹⁴ Dato estimado, el resto proviene de mediciones reales o interpolación de mediciones reales. V_s y V_{s30} corresponden a los valores de V_s promediados (media armónica) en todo el depósito de suelo y hasta los primeros 30 metros.

				Bordes absorbentes en la base	
Mallado No Fino2	3	25	1	Campo libre en las caras del modelo y Bordes absorbentes en la base	3
Mallado No Fino3	3	25	1	Campo libre en las caras del modelo y Bordes absorbentes en la base	5

Se elige la frecuencia de 63 Hz debido a que es la frecuencia predominante en la carga entregados por CAF. Por otra parte, los amortiguamientos de 2, 3 y 5% fueron elegidos debido a que los amortiguamientos típicos en suelos oscilan entre 2 y 5% (Inc., 2012), así es posible abarcar el rango completo típico del suelo.

Para verificar los resultados obtenidos de cada uno de los modelos, se eligieron distintos puntos de control. En estos puntos se registran el desplazamiento, velocidad y aceleración en los distintos ejes para la circulación del tren a través del modelo. Cabe mencionar que para el modelo simplificado la carga fue filtrada a partir de frecuencia de 25 Hz. Primero que todo, en la Tabla 6. 9 se muestran los tiempos de cálculo en lo que se demoró cada modelo.

Tabla 6. 9 Tiempo de cálculo de los ditintos modelos.

Modelo	Tipo mallado	Amort. [%]	Tiempo de cálculo [horas]
1	Mallado Fino	2	24
2	Mallado Grueso	2	4.5
3	Mallado Grueso	3	6
4	Mallado Grueso	5	5.5

Es necesario mencionar que la carga es impuesta en el modelo como una fuerza sobre la losa de vías, mediante el comando “*apply*”. La carga es importada desde un archivo de texto y se ajusta con un multiplicador impuesto a cada valor de la carga de dicho archivo. Es necesario ajustar este factor hasta obtener valores razonables. Para ellos se realizan pruebas con distintos valores de dicho multiplicador y se compara la velocidad y aceleración vertical en la losa con mediciones reales realizadas en otros estudios previos.

Se aplica la carga en la losa debido a que esto permite la omisión de ciertos elementos de las vías que implicarían mayores tiempos de cálculos a causa del tamaño de los elementos en la modelación (riel y pads fijadores). Esto también es válido ya que en todos los modelos que se estudiarán, estas condiciones no varían en absoluto, de modo que es una situación constante en todos ellos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las estructuras de vías, es decir, los rieles y pads amortiguan y modifican la carga (junto con su contenido de frecuencias) que viaja desde el contacto de la *rueda – riel* hacia la subestructura, contribuyendo también a la mitigación de las vibraciones.

6.2.1. Efecto del amortiguamiento

FLAC3D tiene dos modos de representar el amortiguamiento del suelo. El primero es el llamado amortiguamiento histerético y el segundo es el amortiguamiento tipo Rayleigh. Si bien en suelos y rocas el amortiguamiento es mayormente histerético, este método de modelamiento trae dos problemas principales (Cundall, 2006):

- Las funciones histeréticas no amortiguan todas las componentes de igual manera cuando se tiene una superposición de ondas
- Las funciones histeréticas dependen del camino de las ondas, lo que dificulta su interpretación.

Para estudiar el efecto del amortiguamiento se elige un amortiguamiento del tipo Rayleigh debido a que este tipo de amortiguamiento representa muy bien el amortiguamiento del suelo cuando se trabaja en el dominio del tiempo, además de que, para un rango acotado de frecuencias, este tipo de amortiguamiento es aproximadamente independiente de la frecuencia. Por otra parte, este amortiguamiento es independiente del camino de las ondas.

6.2.1.1. Dominio del tiempo

Se comparan los resultados obtenidos entre los modelos 2, 3 y 4, es decir, los modelos de mallado grueso con distintos niveles de amortiguamiento (Tabla 6. 8). Los resultados que se muestran son los desplazamientos, la velocidad y la aceleración en superficie, además que se estudian las frecuencias de interés en la superficie. Los puntos de control considerados en este estudio corresponden a:

- 1- Clave del Túnel (H1)
- 2- Base del Túnel, en la LC¹⁵ (H2)
- 3- Superficie libre en la LC (H3)
- 4- Superficie libre a 10m de LC (H4)
- 5- Superficie libre a 20m de LC (H5)
- 6- Superficie libre a 30m de LC (H6)
- 7- Superficie libre a -10m de LC (H7)
- 8- Superficie libre a -20m de LC (H8)
- 9- Superficie libre a -30m de LC (H9)
- 10- Punto de aplicación de la carga (C1)

¹⁵ LC se le llama a la Línea Central de un Túnel, que es por donde pasa el eje del trazado de un Túnel y el eje central del túnel

A modo más ilustrativo se presenta la Figura 6. 20

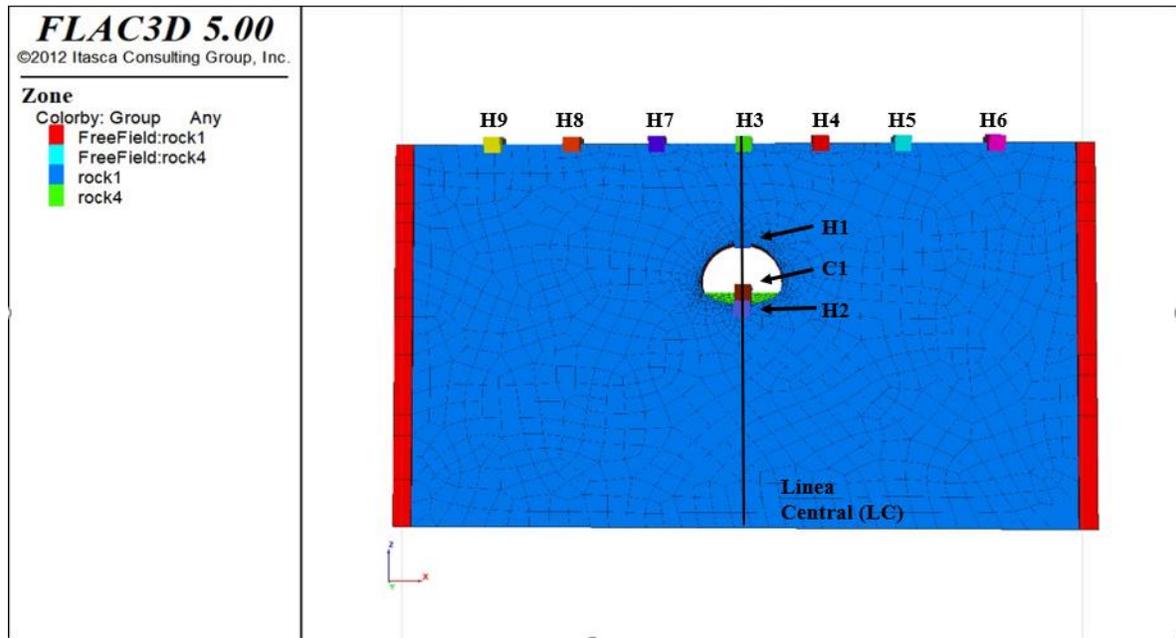


Figura 6. 20 Historial de registros tanto en las cercanías del túnel como en superficie, además del punto de aplicación de la carga. Modelo sacado de FLAC3D.

En el siguiente sub capítulo se estudia el efecto del amortiguamiento del suelo en un modelo simplificado, es decir, un modelo de 1 m de longitud, de mallado grueso y con condiciones de campo libre. Se estudiará el efecto de 3 niveles de amortiguamientos típicos en suelos finos, los cuales corresponden a 2, 3 y 5%. Los resultados se muestran a continuación. La

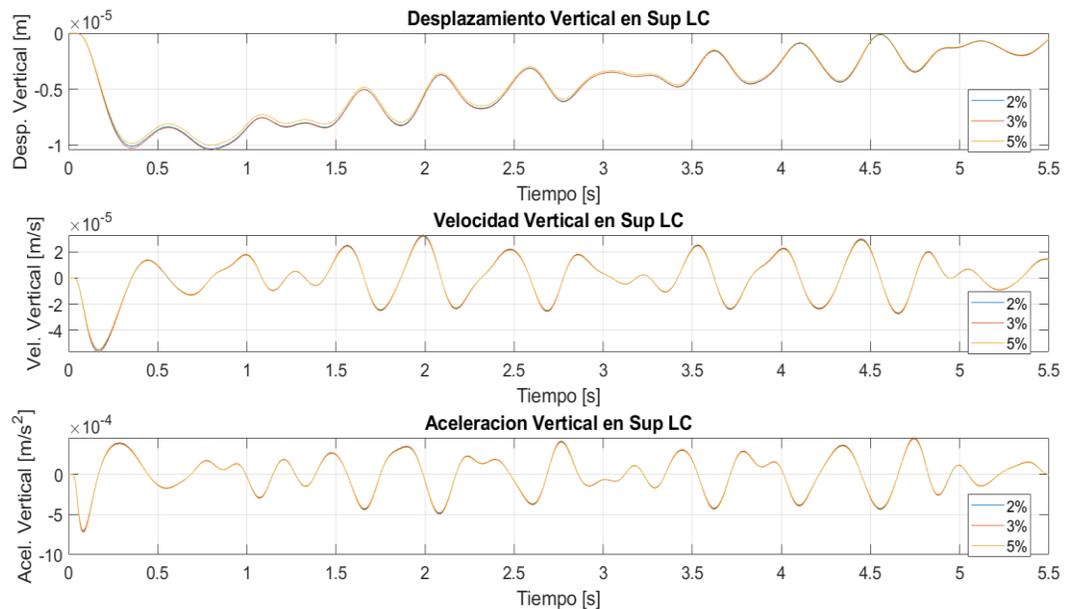


Figura 6. 21 muestra una comparación entre los resultados obtenidos en superficie en la LC para los tres amortiguamientos escogidos. Se grafican los desplazamientos verticales en este punto (gráfico

superior de dicha figura), las velocidades verticales (gráfico en el medio) y la aceleración vertical (gráfico inferior). La

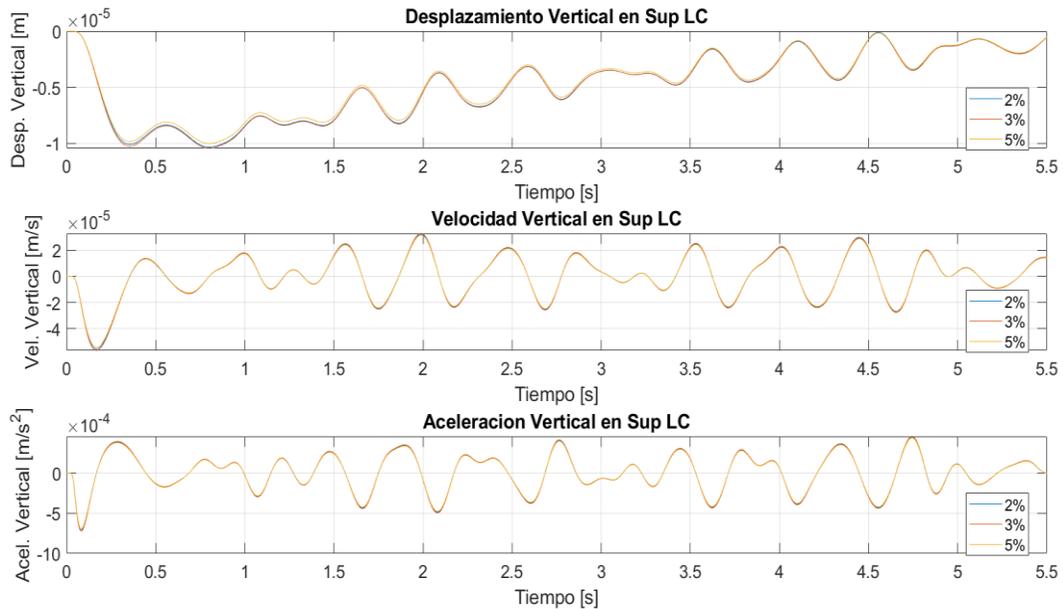


Figura 6. 21, por su parte, muestra estos mismos resultados, pero para puntos alejados de la LC a nivel superficial, es decir, a 10 metros alejado de la LC (columna de la izquierda), a 20 metros (columna central) y a 30 metros alejado de la LC (columna de la derecha).

Primero que todo cabe mencionar que los tiempos de cálculos son muy similares entre los 3 modelos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Pero como se puede apreciar el amortiguamiento de 2% es el óptimo en tiempo de cálculo, que es un 25% más rápido que el de 3%. Como se puede apreciar en las

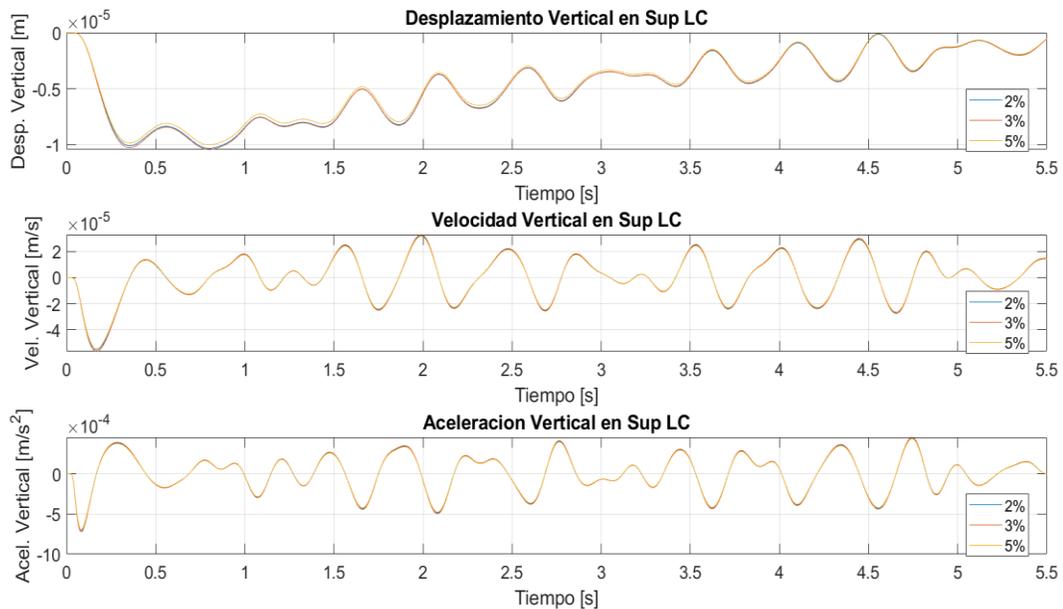


Figura 6. 21 y Figura 6. 22 los resultados no tienen diferencia aparente entre los modelos de 2 y 3% de amortiguamiento, y que en el tercer caso los resultados en superficie son un poco menores, esto quiere decir que, a mayor amortiguamiento del suelo, menor serán las vibraciones sentidas en superficie. De este modo se propone estudiar el primer caso de amortiguamiento, tanto por menores tiempos de cálculos y debido a que muestra resultados más conservadores.

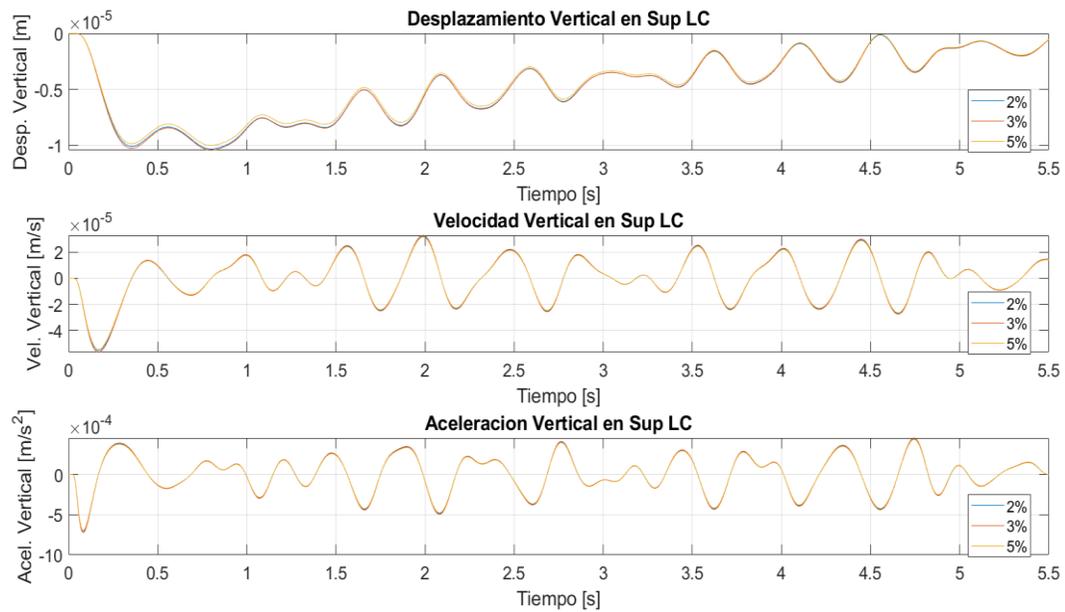


Figura 6. 21 Comparación del desplazamiento, velocidad y aceleración vertical en la línea central del túnel en la Superficie Libre.

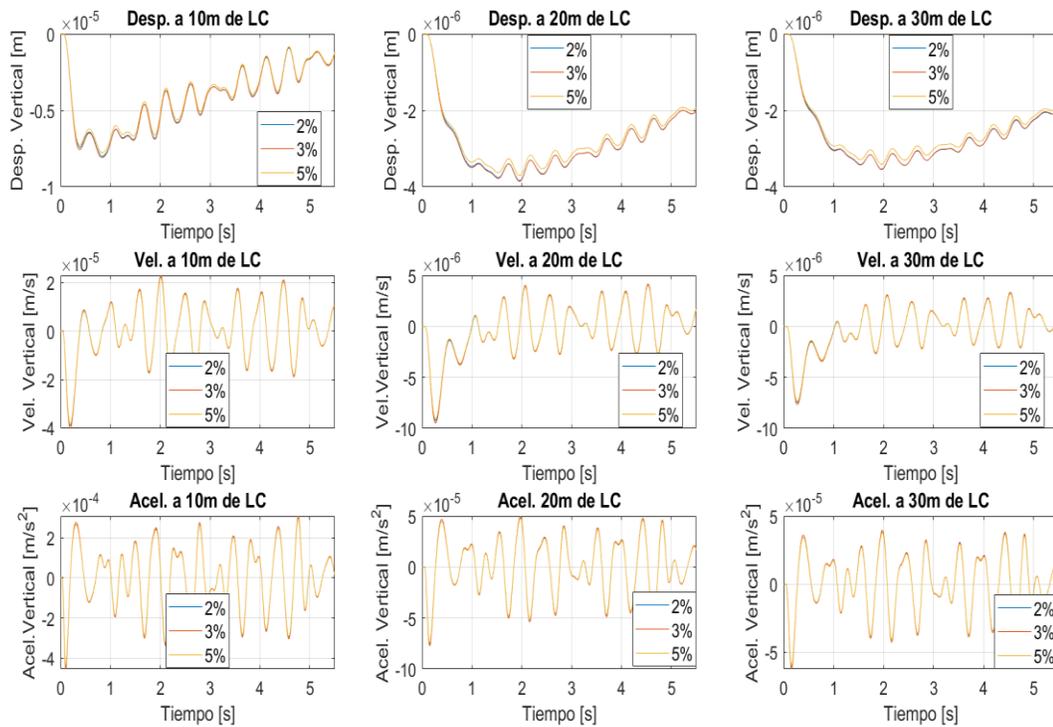


Figura 6. 22 Comparación del desplazamiento, velocidad y aceleración vertical en puntos superficiales alejados de la línea central del túnel.

Al estudiar el efecto de la distancia del punto de control, es posible notar que el nivel de desplazamiento disminuye, lo que se debe a la pérdida de energía que sufre la onda al propagarse en el medio, estas pérdidas se deben a fuerzas de roce en el medio particulado. Esta pérdida de energía es casi independiente del nivel de amortiguamiento, la única influencia que tiene es que a medida que se aleja de la LC del túnel el nivel de desplazamiento es levemente menor. Al alejarse de la LC, todos los parámetros estudiados disminuyen en magnitud, pero poseen un comportamiento similar. En el caso de estar en la línea central y alejarse 10m la magnitud disminuye a un 10% del valor central, y este comportamiento se repite al alejarse nuevamente otros 20m; sin embargo, esto no se repite al comparar los parámetros a 20 y 30m donde la disminución es casi imperceptible.

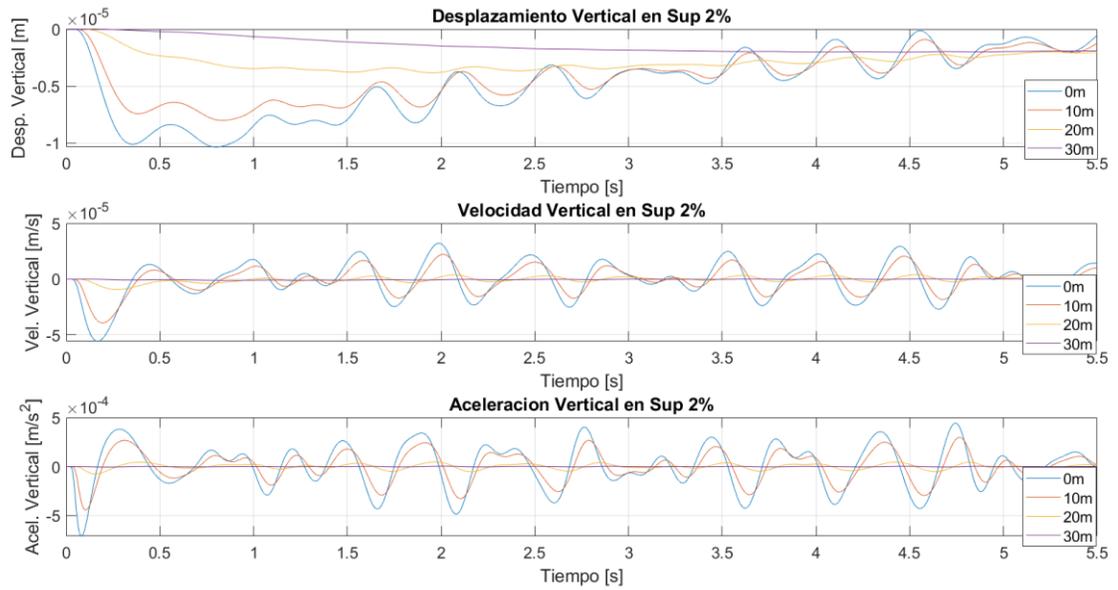


Figura 6. 23 Efecto de la distancia en el desplazamiento, la velocidad y aceleración verticales en la superficie libre para el modelo de 2% de amortiguamiento.

Tal como se puede ver en la

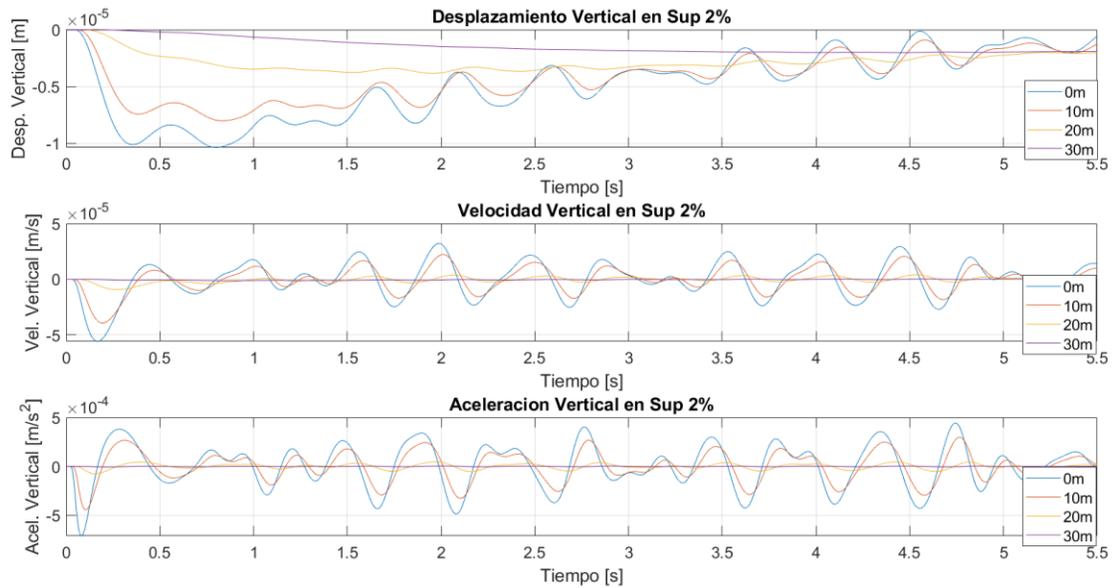


Figura 6. 23 las magnitudes de los parámetros disminuyen con la distancia, además de que existe un pequeño desfase en la ocurrencia de los *peaks*, esto se debe a que a mayor distancia mayor es el tiempo que le toma a la onda en llegar al punto de control. La Figura 6. 24 muestra una distribución más grafica de la aceleración vertical (eje *z*) en todo el modelo para un tiempo en particular. Como se puede apreciar las aceleraciones se concentra en las estructuras del túnel (revestimiento y losa) y luego disminuye en los alrededores.

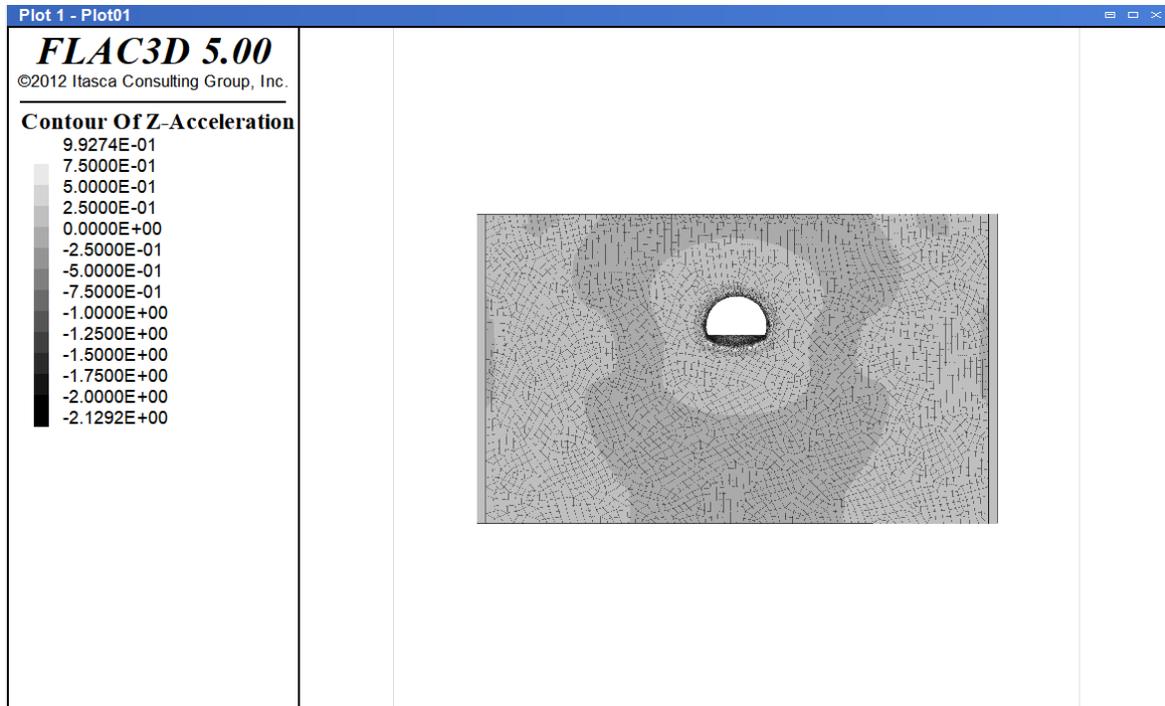


Figura 6. 24 Distribución de la aceleración vertical en el modelo de estudio. Unidades en $[m/s^2]$

A continuación, se graficarán los valores máximos de los parámetros obtenidos para los tres modelos de estudio. En la Figura 6. 25 se grafican los desplazamientos máximos en las 3 direcciones para todos los puntos de control superficiales (H3 a H9). En la Figura 6. 26 se grafica los máximos para la velocidad y finalmente en la Figura 6. 27 se grafican las máximas aceleraciones. Las primeras conclusiones que se puede sacar en estos gráficos es que los valores de los parámetros en la dirección longitudinal del túnel (correspondiente al eje “y”) son mucho menores que en las otras direcciones. Los valores máximos son casi 100 veces más pequeños. Esto corrobora las deformaciones planas. A partir de ahora se omitirán los resultados obtenidos en el eje longitudinal.

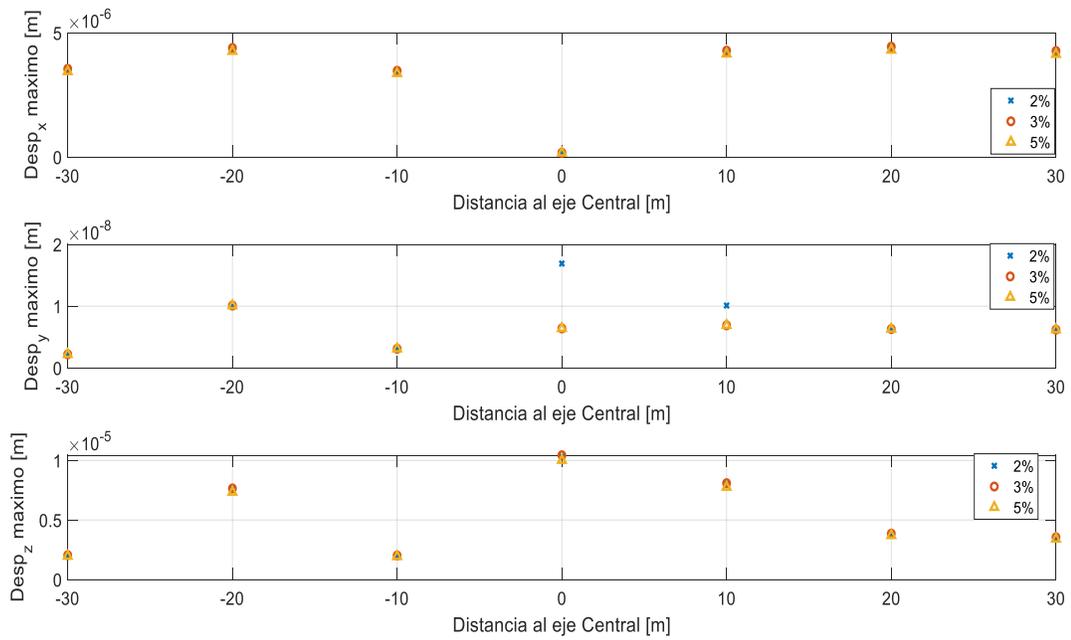


Figura 6. 25 Variación del desplazamiento máximo en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento.

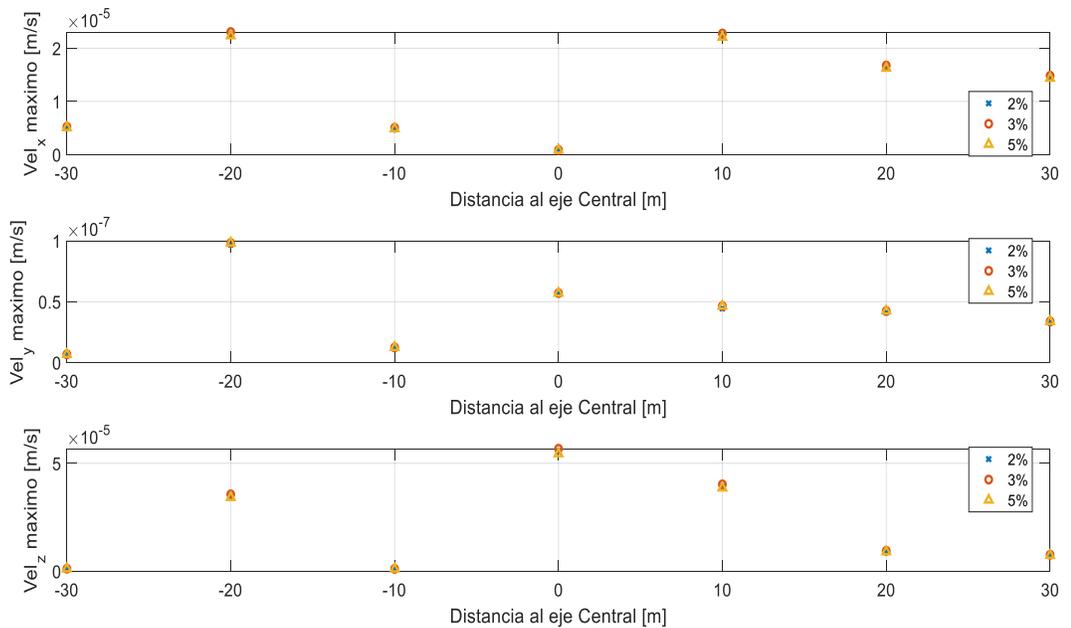


Figura 6. 26 Variación de la velocidad máxima en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento

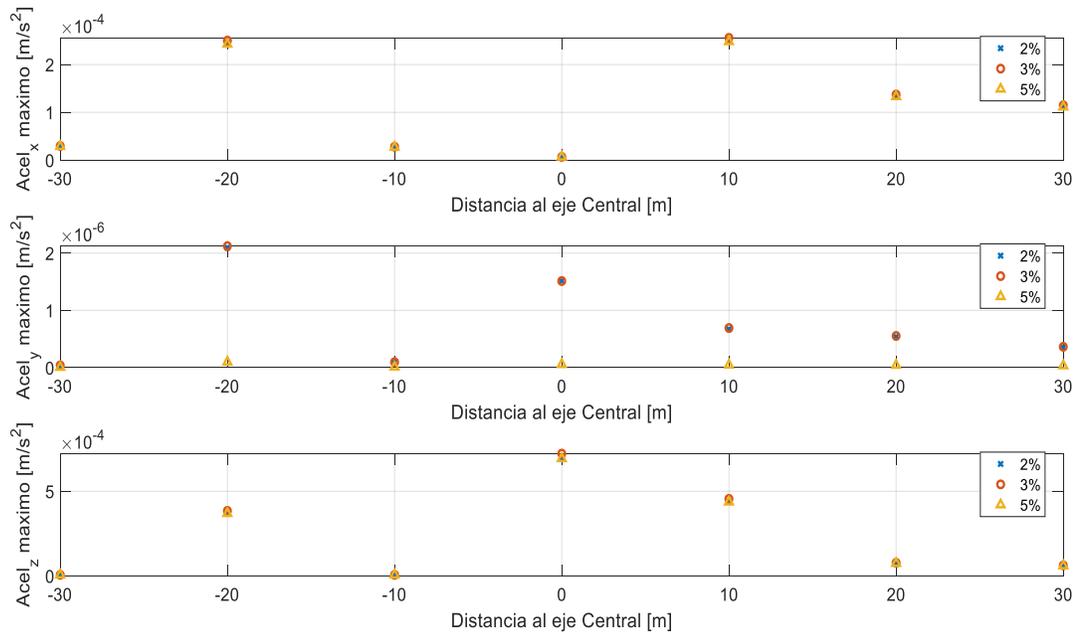


Figura 6. 27 Variación de la aceleración máxima en función de la distancia al eje central del túnel y para distintos niveles de amortiguamiento.

Como se puede apreciar en algunos casos el amortiguamiento de 5% muestra valores más pequeños que en el caso de amortiguamientos menores, esto se aprecia más en la dirección horizontal perpendicular al eje del túnel (eje x) o en el eje vertical (eje z). En el caso del eje horizontal paralelo a la dirección del túnel, los valores no se ven afectados, esto es debido a la simetría en dicha dirección. En base a lo anterior se elige amortiguamiento del 2% para estudiar un modelo más complejo, esto se debe a que no se aprecian diferencias considerables en los parámetros estudiados y los tiempos de cálculos son menores para este caso.

6.2.1.2. Dominio de las frecuencias

Tal como se aprecia en la Figura 6. 28 en los distintos modelos no existe variación en los resultados. La frecuencia dominante del suelo está en torno a 2 Hz. Esto se relaciona muy bien con los resultados obtenidos por el estudio hecho por Acevedo (Acevedo Plaza, 2020) y Godoy (Godoy, González, & Sáez, 2015), donde muestran que la frecuencia natural del suelo de Quilicura es de aproximadamente 1 Hz (ver Figura 6. 30 y Tabla 6. 7). Con esto podemos concluir que cualquiera de los amortiguamientos usados no tiene mayor influencia en los resultados, dado que los resultados son muy similares entre ellos. Dado que el caso de 2% de amortiguamiento presenta mayores valores en los resultados de algunos de los parámetros estudiados y tiene menores tiempos de cálculos, se elegirá por sobre los otros amortiguamientos. A modo de recomendación para el análisis de las frecuencias, es necesario tener un paso de tiempo constante en el modelo en vez de uno diferenciado para distintas zonas. Por ello se recomienda utilizar el comando de Flac3D *set dynamic dt*, en vez de *set dynamic multi on*¹⁶. Este último comando permite tener un paso de tiempo diferenciado entre zonas de distinta rigidez y tamaño, con el fin de optimizar los tiempos de cálculos. Este comando se recomienda para hacer las pruebas preliminares o bien en el caso de que se desee estudiar sólo las vibraciones en el

¹⁶ Ver anexo.

dominio del tiempo, ya que trae consecuencias al realizar por ejemplo funciones de transferencia, al tener un espaciado diferente en los registros temporales.

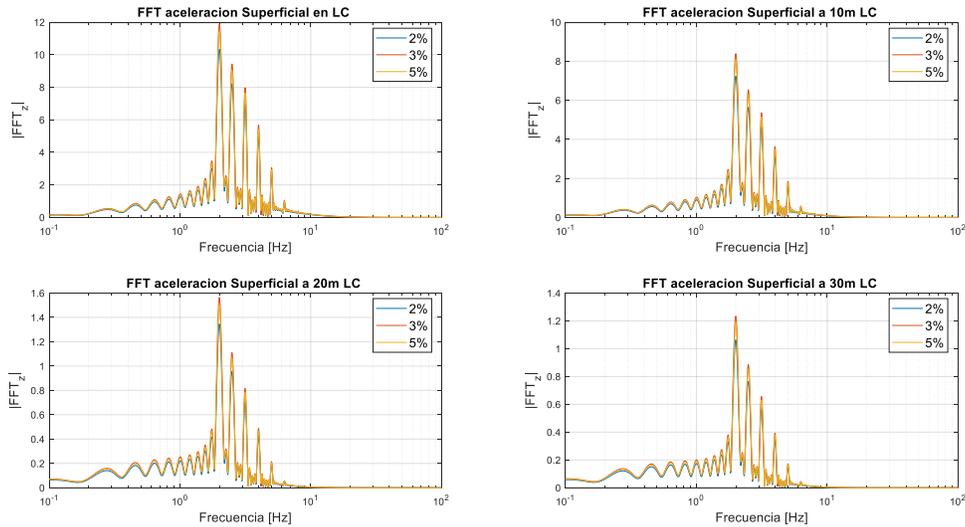


Figura 6. 28 Transformada de fourier de la aceleracion vertical en la superficie libre.

Podemos notar también que la energía en la señal se mantiene casi constante al comparar la señal en la línea central y a 10 metros de ella. Sin embargo, la energía disminuye drásticamente en los casos de 20 y 30 metros de distancia. En estos últimos dos casos la energía es similar.

Tabla 6. 10 Frecuencias predominantes de la respuesta en superficie libre.

Modo	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]
	Amort 2%	Amort 3%	Amort 5%
1	2	2	2
2	2.5	2.5	2.5
3	3.2	3.2	3.2
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6.3	6.3	6.3

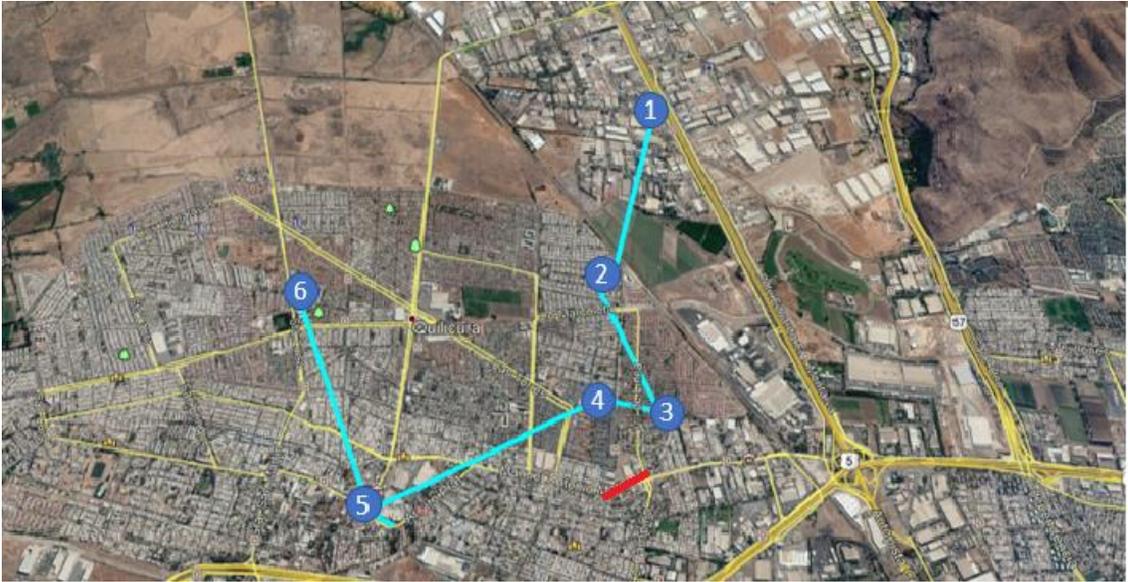


Figura 6. 29 Zona de estudio de (Acevedo Plaza, 2020) y lugar de estudio de esta memoria (Rojo).

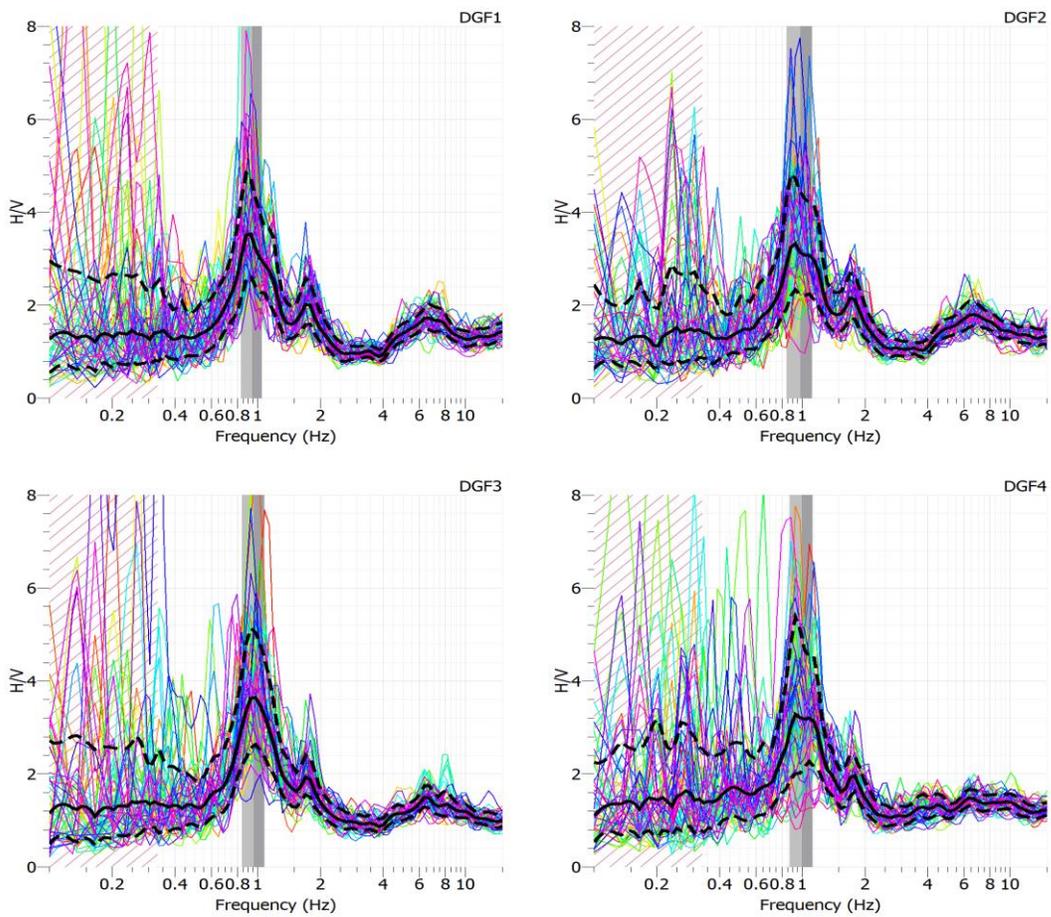


Figura 6. 30 Frecuencia natural del suelo de Quilicura, (Acevedo Plaza, 2020), Zona de estudio 3.

6.2.2. Efecto del tamaño de los elementos finitos

Para comparar el efecto del tamaño de los elementos finitos que representan el suelo, se comparan dos modelos idénticos en condiciones, pero uno con una densificación de elementos que permitan la propagación de las ondas de mayores frecuencias. El primer modelo corresponde al modelo de 2% de amortiguamiento estudiado en la sección 6.2.1. *Efecto del amortiguamiento* y mostrado en la Figura 6. 19. El segundo modelo corresponde a un modelo con tamaño de elemento más fino, generado con el comando de Flac3D, “*generate zone densify maxlen*”, donde se le debe especificar el tamaño máximo de elemento en las 3 direcciones, es decir, se le especificó un tamaño máximo de 1.3 [m], que según la Tabla 6. 6 permite un paso de una frecuencia máxima de 63 [Hz]. Cabe mencionar que en ambos casos las señales de entrada deben contener hasta la frecuencia especificada en dicha tabla para no generar errores en los resultados, por ruidos de ondas propagadas incorrectamente. El mallado del segundo modelo se muestra a continuación:

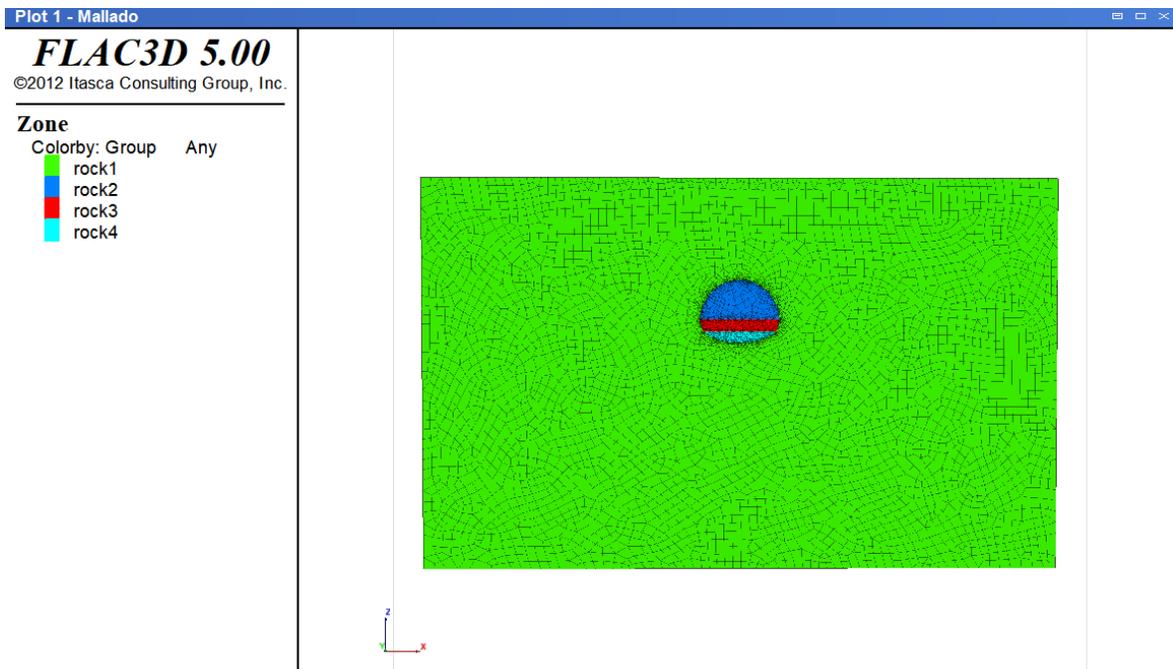


Figura 6. 31 Mallado de modelo Fino, Tamaño máximo 1.3 m

Las señales de carga utilizadas y sus frecuencias asociadas se muestran a continuación

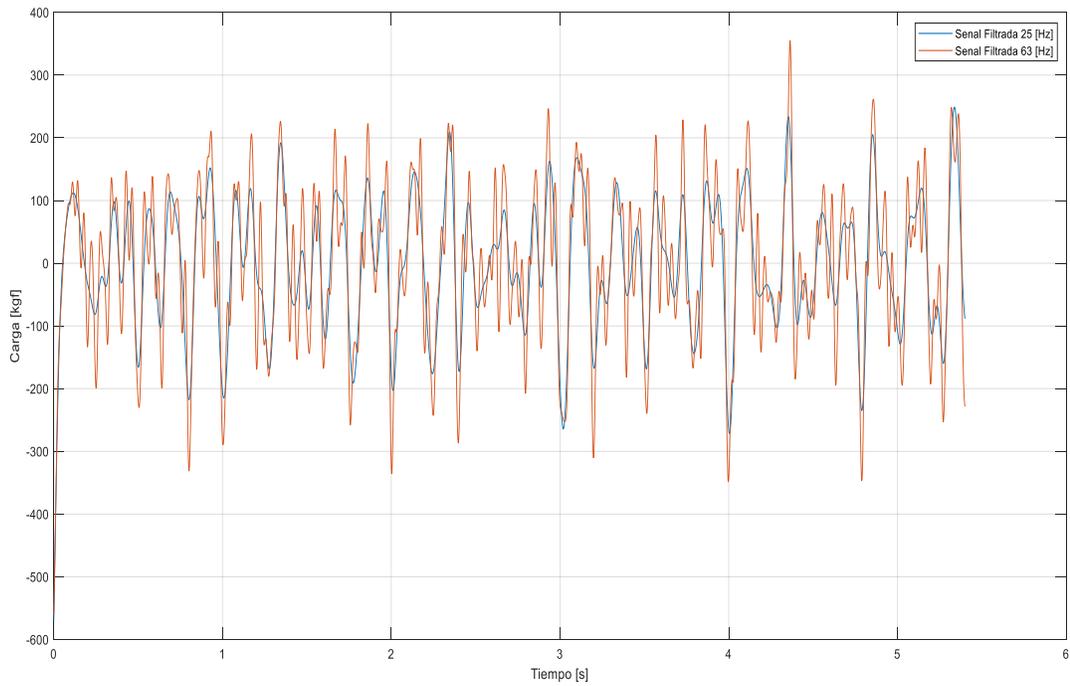


Figura 6. 32 Señales filtradas a 25 Hz y 63 Hz.

Graficando estas señales en el espacio de las frecuencias se tiene lo siguiente:

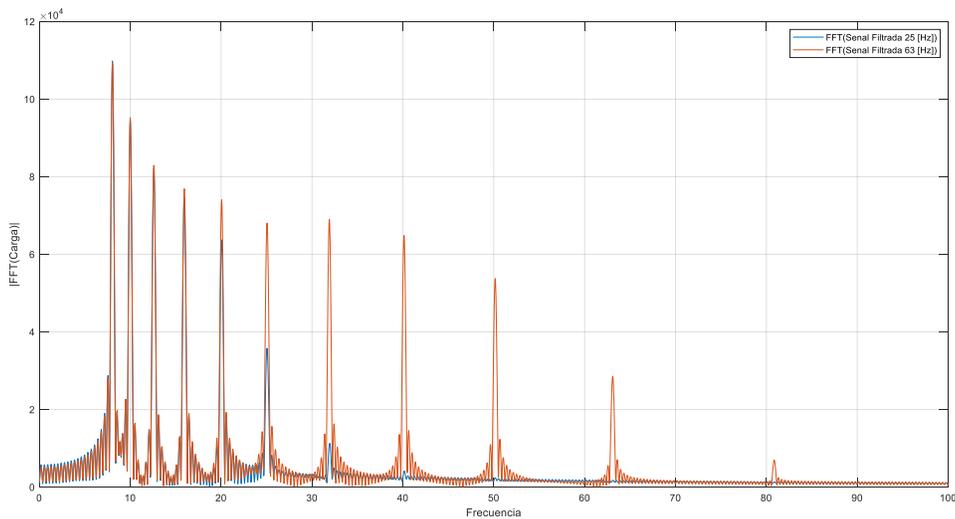


Figura 6. 33 Señales en el espacio de las frecuencias

Los resultados obtenidos en la superficie libre se muestran en las siguientes figuras. Primero se muestran los desplazamientos en superficie sobre la línea central para las direcciones horizontal (eje x) y vertical (eje z) para modelo mallado fino y modelo mallado grueso.

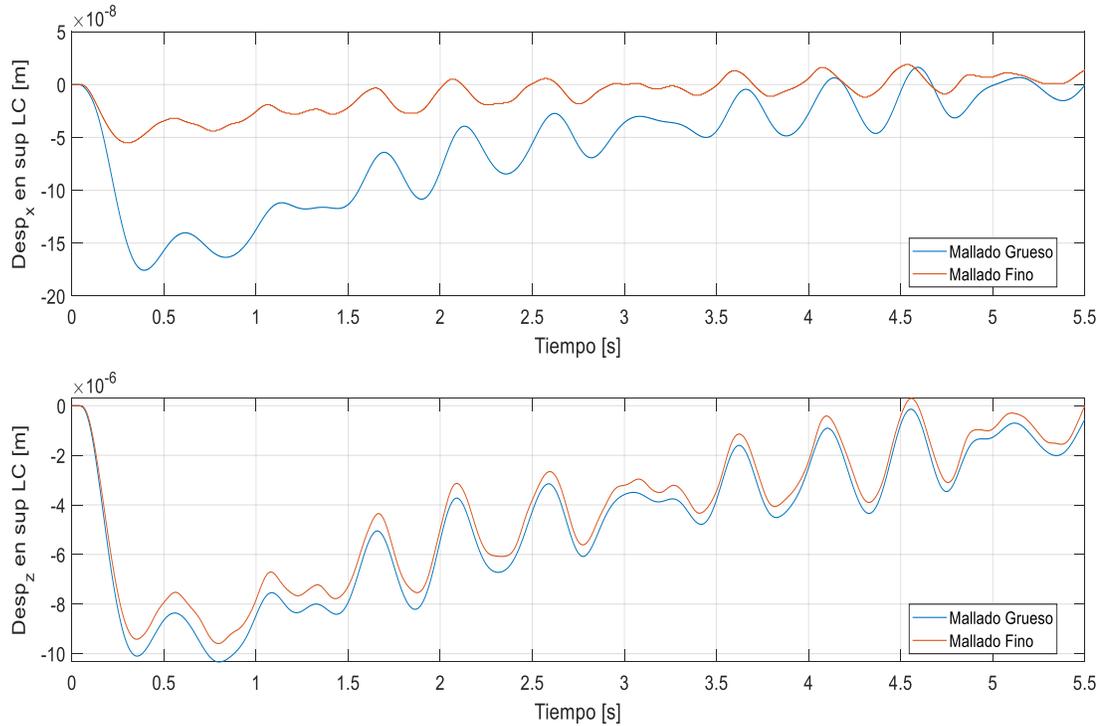


Figura 6. 34 Comparación de desplazamiento de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.

Primero se muestran las velocidades en superficie sobre la línea central para las direcciones horizontal (eje x) y vertical (eje z) para modelo mallado fino y modelo mallado grueso.

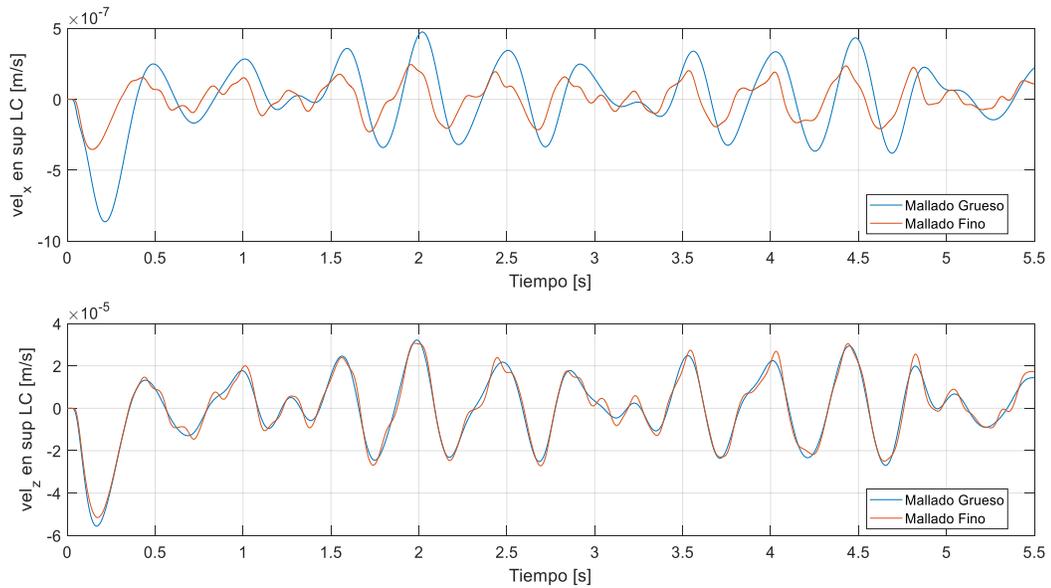


Figura 6. 35 Comparación de velocidad de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.

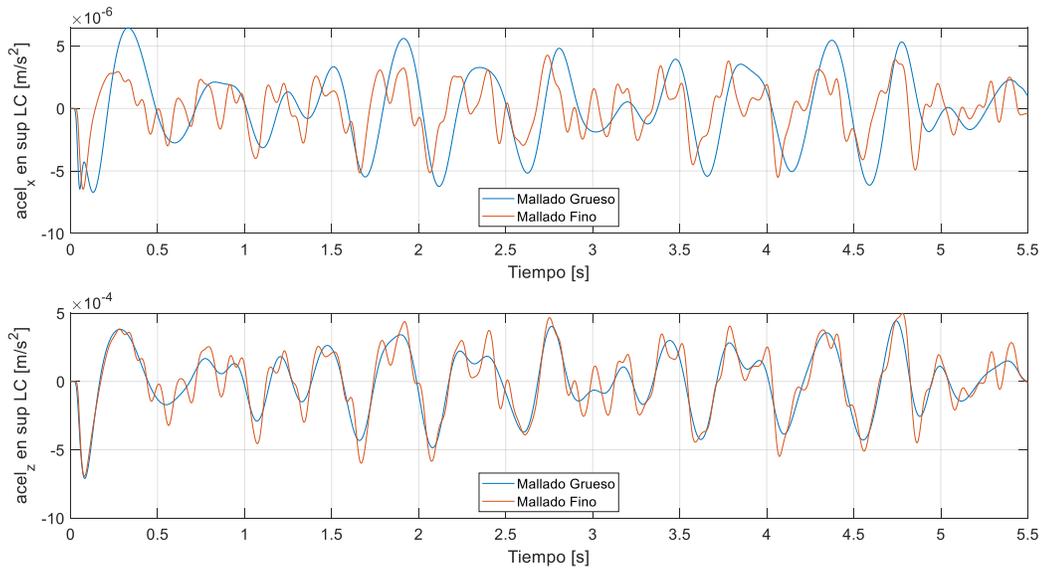


Figura 6. 36 Comparación de aceleración de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre en la Línea Central.

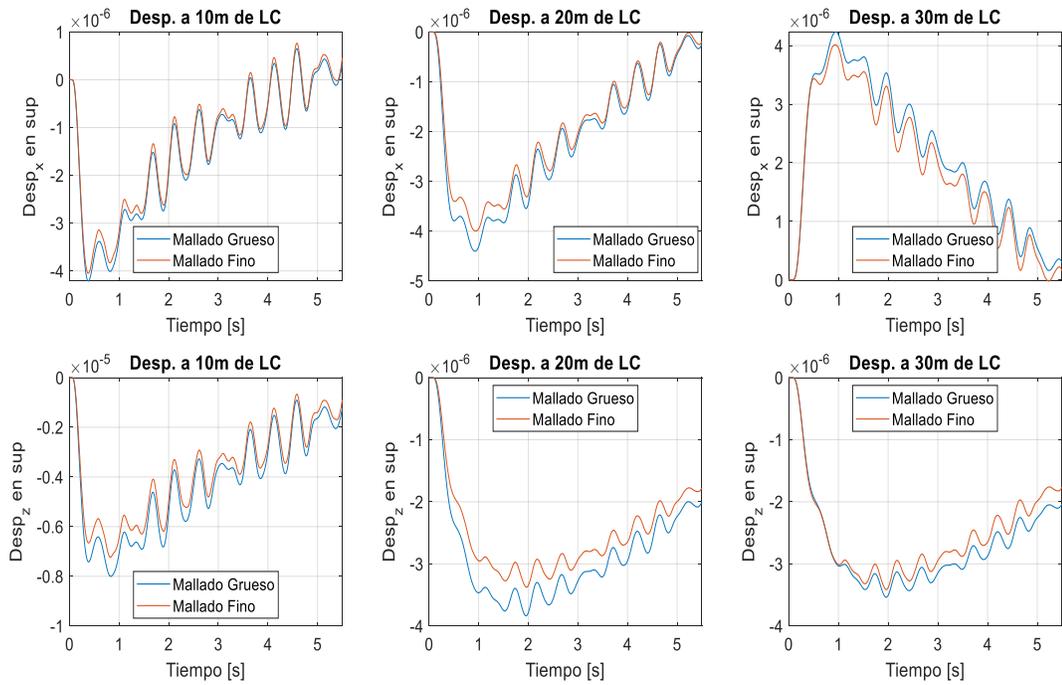


Figura 6. 37 Comparación de desplazamiento de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Dirección horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z.

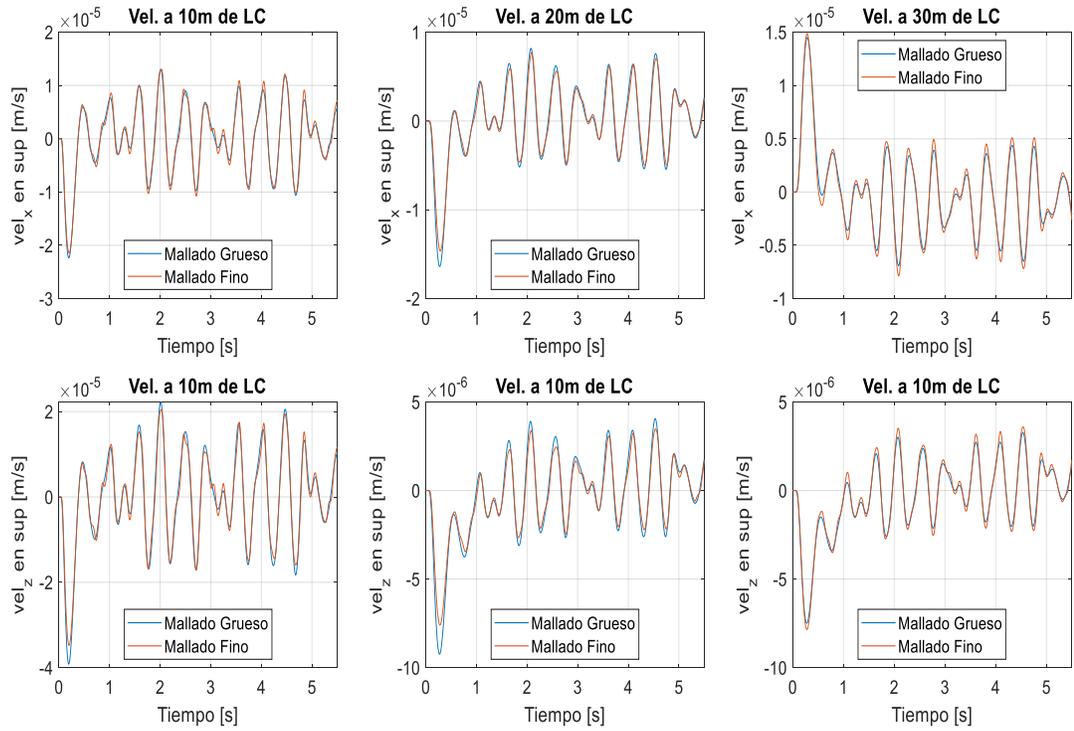


Figura 6. 38 Comparación de velocidad de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Dirección horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z .

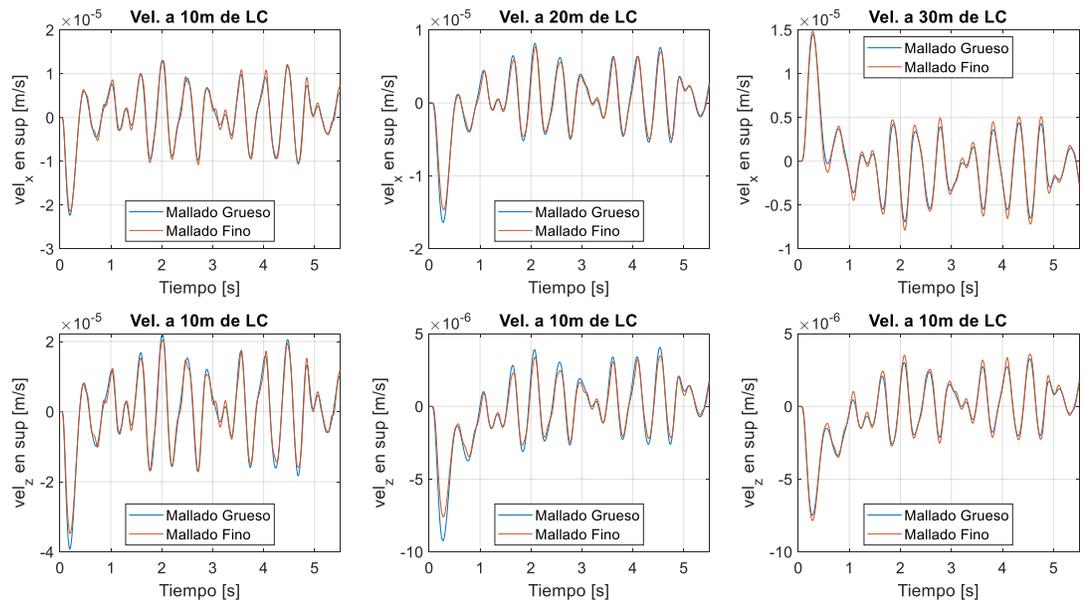


Figura 6. 39 Comparación de aceleración de modelo mallado fino y grueso. Punto de referencia en la superficie libre alejados de la Línea Central. Dirección horizontal (perpendicular al túnel) x y vertical z .

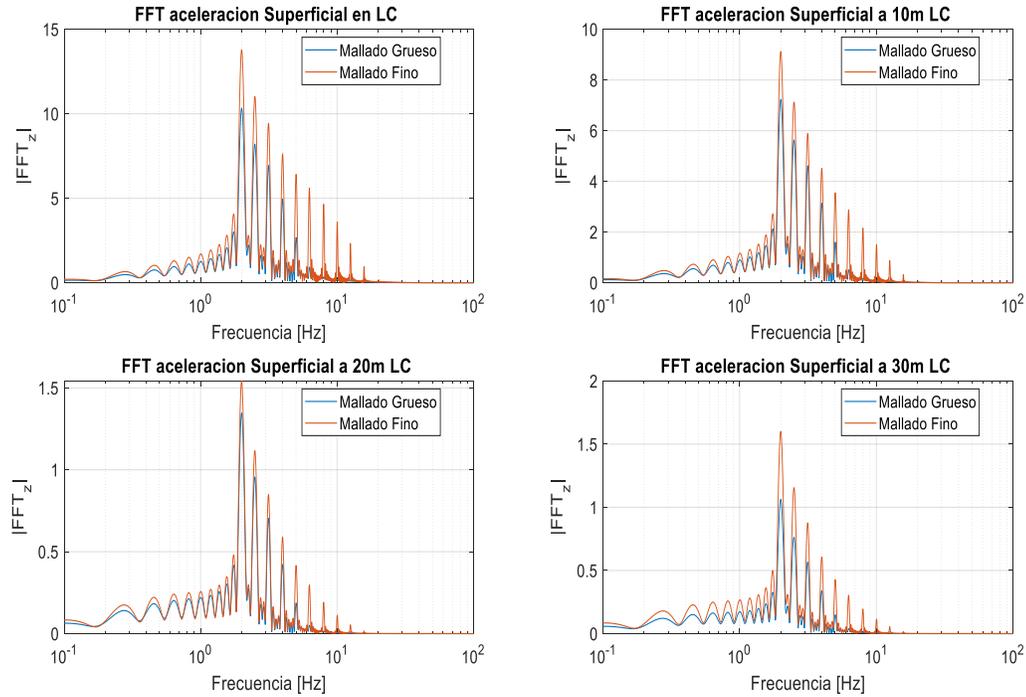


Figura 6. 40 Transformada de Fourier de la señal obtenida para mallado fino y grueso de la aceleración vertical en superficie libre.

Tal como se puede observar entre las Figura 6. 34 y Figura 6. 39 podemos notar que los resultados son muy parecidos entre sí. Las magnitudes no tienen mayor variación entre ellos. La principal diferencia que se tiene entre ambos modelos es que el modelo más fino posee excitaciones a mayores frecuencias que no aparecen en el modelo más grueso. Esto se aprecia claramente en la Figura 6. 40. En esta figura se observa que las frecuencias bajas son exactamente iguales en ambos modelos, pero que, en el modelo grueso, existe una mayor pérdida de energía a frecuencias medias. También se aprecia que existen frecuencias un poco mayores en el caso del modelo fino, debido a frecuencias de excitaciones en la carga de entrada.

Con esto podemos decir que un mallado más fino no entrega resultados mucho más precisos que en el caso de un modelo más simplificado. La necesidad de usar un modelo más fino recae solamente en querer estudiar frecuencias más altas y, por último, frecuencias entre 60 y 80 Hz traen mayores problemas debido al ruido inducido más que a las vibraciones. Dado que este es un estudio de vibraciones directamente dicho rango de frecuencias será omitido. Para el caso de este estudio, las frecuencias de interés están acotadas, debido a la zona en que se encuentra el túnel en cuestión, el tipo de edificación que está cerca de la línea y a que es una zona residencial y comercial. En base a los resultados anteriores, los tiempos de cálculos y las frecuencias de estudio, se elegirá un modelo de mallado para frecuencias de 25 Hz (tamaño máximo de elemento elegido es de 3 [m]), con un amortiguamiento de 2% y de 50m de largo¹⁷.

¹⁷ Se elige un modelo de 50m por sobre 100m debido a tiempos de cálculos y a que en similares condiciones de carga ambos modelos no exhiben diferencias en los resultados. Ver anexo

7. Resultados obtenidos

Para ver el efecto de la losa flotante en las vibraciones superficiales, se elige un modelo de 50 metros de longitud en que la manta es modelada como un elemento volumétrico (lo que en Flac3d se llama *zona*) de espesor de 10^{18} cm. Este elemento de zona se modela de dos formas dependiendo del modelo:

- **Sistema Base:** este *grupo* de elementos, correspondiente al *grupo* “Rock5” (Figura 7. 1) es modelado con las propiedades de la losa de la subestructura.
- **Sistema Amortiguado o Sistema Losa Flotante:** este *grupo* de elementos es modelado con propiedades de una manta elastomérica.

Dado que las losas flotantes se pueden modelar de manera sencilla como una masa suspendida en sobre un resorte con amortiguador viscoso (ver Figura 7. 3) fue necesario cambiar el modelo estudiado en la sección anterior. En este caso se agrega un nuevo grupo de zonas¹⁹ que simule la manta bajo la losa. En las Figura 7. 1 se muestra el modelo a estudiar y Figura 7. 2 se ve con más detalle. La manta elastomérica se modela como un apoyo de superficie completa. Los parámetros de esta manta se especifican a continuación:

Manta	Rigidez estática [N/mm ²]	Rigidez dinámica [N/mm ²]	Amortiguamiento [%]
Apoyo sup. completa	0.08	0.29	20

El amortiguamiento del suelo fue configurado con 2%, la frecuencia máxima de carga está determinada en 25 Hz, con lo que el tamaño máximo del elemento es de 3 metros. El amortiguamiento de la manta fue seleccionado como 10% según lo encontrado en la literatura. (Fernandez, 2014). El amortiguamiento se mantiene constante para todo el rango de frecuencias estudiado.

En las Figura 7. 1 y Figura 7. 2 se especifica en la descripción del modelo los *grupos* de elementos. Estos grupos corresponden a los siguientes:

- Rock1= Corresponde al suelo que rodea al túnel
- Rock2= Etapa constructiva correspondiente a la Bóveda del túnel
- Rock3= Etapa constructiva correspondiente a parte de la contra – bóveda
- Rock4= Etapa constructiva correspondiente a parte de la contra – bóveda y posteriormente corresponde a la losa de la subestructura.
- Rock5= Etapa constructiva correspondiente a parte de la contra – bóveda y posteriormente corresponde a la losa de la subestructura (Modelo *Base*) y a la manta elastoméricas (Modelo *Losa Flotante*).

¹⁸ Si bien el espesor de la manta es de 5cm, hacer un mallado tan fino en el modelo trae problemas en los volúmenes de los elementos finitos. El menor espesor con el que se puede evitar estos problemas fue con este espesor.

¹⁹ **Zonas** se llama a los elementos volumétricos con los que trabaja FLAC 3D. y **Grupo** se le llama grupo a un conjunto de zonas específicos.

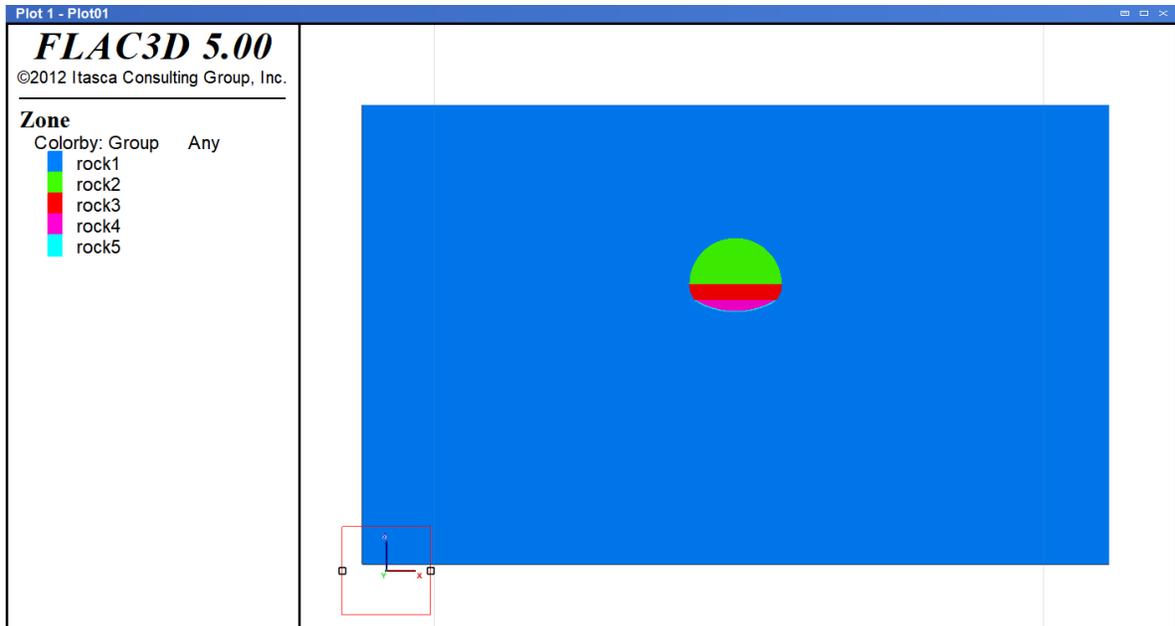


Figura 7. 1 Modelo para estudio del efecto de elastómero bajo losa

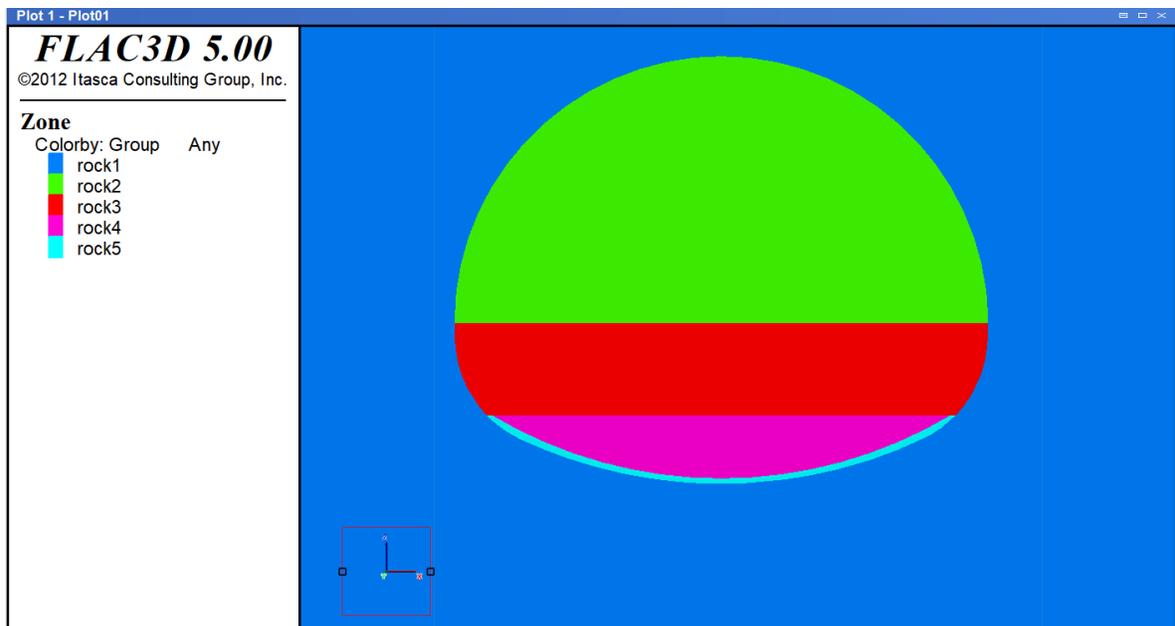


Figura 7. 2 Detalle modelo

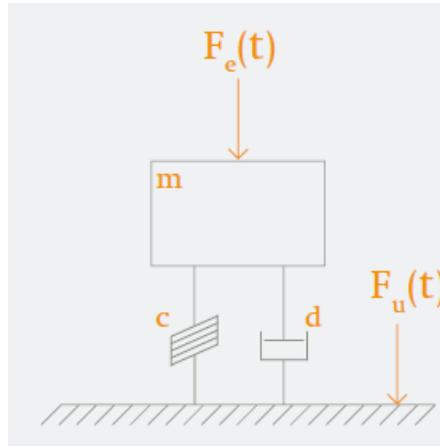


Figura 7. 3 Modelo de losa Flotante

7.1. Respuesta en superficie

Se grafican las aceleraciones, velocidad y desplazamiento verticales en los distintos puntos de control superficiales para comparar el efecto del amortiguador bajo la losa. Dada la simetría del modelo con respecto a un eje central, solamente se graficarán los parámetros (en función del tiempo) de los puntos de control **H3**, **H4**, **H5** y **H6**. Los puntos **H7**, **H8** y **H9** serán usados luego para calcular el porcentaje de variación de los valores máximos comparando ambos modelos

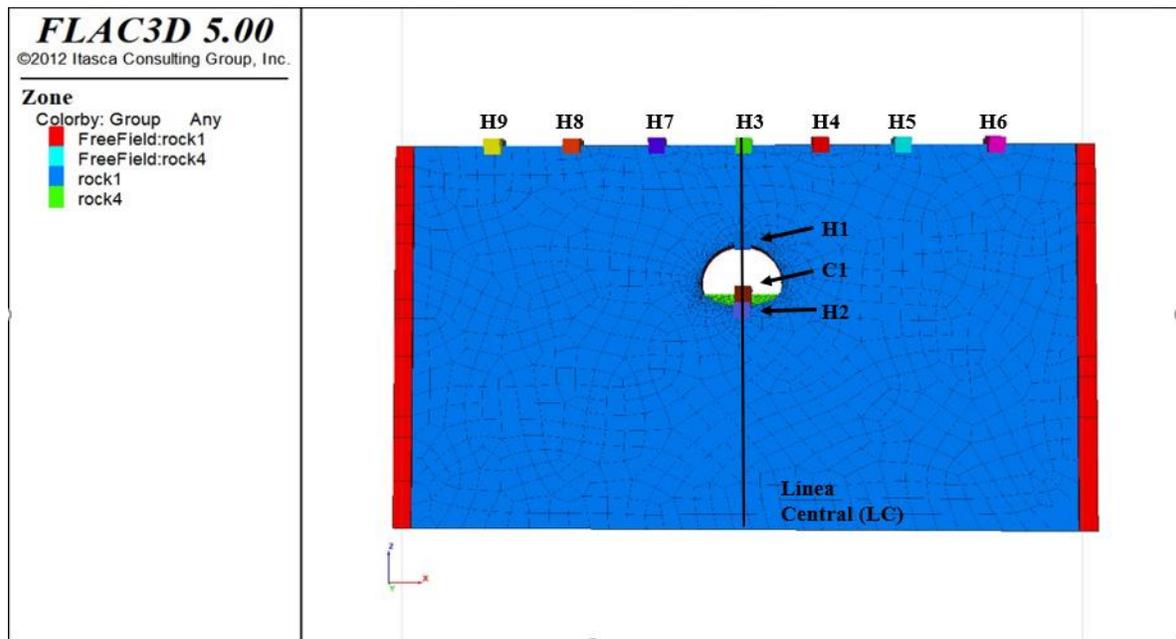


Figura 7. 4 Historial de registros tanto en las cercanías del túnel como en superficie, además del punto de aplicación de la carga. Modelo sacado de FLAC3D

7.1.1. Comparación del Desplazamiento

En cuanto al desplazamiento vertical de los puntos de control es difícil decir, en primera instancia, que el modelo de *Losa Flotante* tiene un efecto real en la disminución del desplazamiento vertical en superficie libre. Sin embargo, para notar su contribución es necesario comparar la diferencia que existe entre una “cresta” y un “valle” en los resultados de ambos modelos. Al hacer este análisis

podemos notar que en el *Caso Base* posee una mayor diferencia entre ambos puntos, es decir, que la amplitud de oscilación para este caso es mayor.

En cuanto a la frecuencia de oscilación no se aprecia mayor diferencia de ambos modelos ni para ninguno de los puntos de control. También es posible notar un pequeño retraso en el tiempo que ocurre la máxima (o mínima) amplitud para el caso de *Losa Flotante*.

La Figura 7. 7 muestra la variación porcentual que existe entre el desplazamiento máximo obtenido entre ambos sistemas, tanto en el eje horizontal perpendicular al túnel (eje x) y el eje vertical (eje z). Tal como muestra esta figura existe una disminución del 10% para los puntos de control **H9** y **H6**, una disminución del 22% para los puntos **H8** y **H5** y los valores máximos del desplazamiento horizontal disminuyen cerca de un 35% para los puntos alejados a 10m de la *LC* (puntos **H4** y **H7**). Esta variación tiene un carácter lineal con respecto a la distancia. Sin embargo, existe un aumento cercano al 250% del valor base para el punto central. En cuanto a la variación del desplazamiento vertical se puede notar que es una variación más acotada. Para los puntos más centrales, es decir, los puntos **H7**, **H3** y **H4** disminuyen su valor máximo en un 35% aproximadamente al valor máximo obtenido con el sistema base. Para los puntos **H8** y **H5** la disminución corresponde al 38 y 42% respectivamente y por último a los puntos extremos la disminución corresponde al 30% con respecto al valor original.

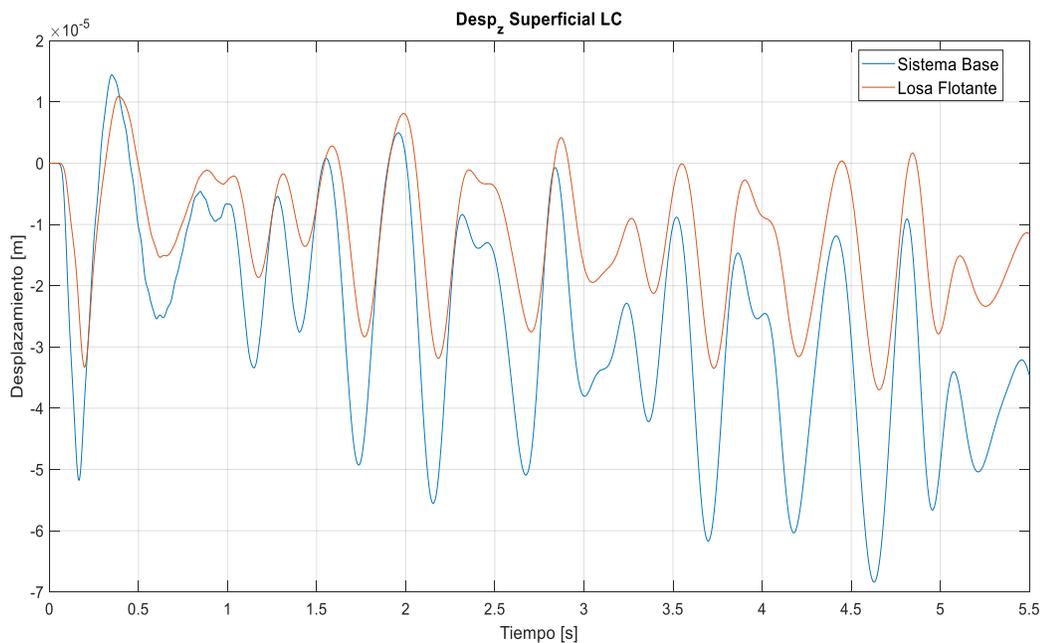


Figura 7. 5 Comparación desplazamiento vertical en superficie Lc del sistema base y con losa flotante

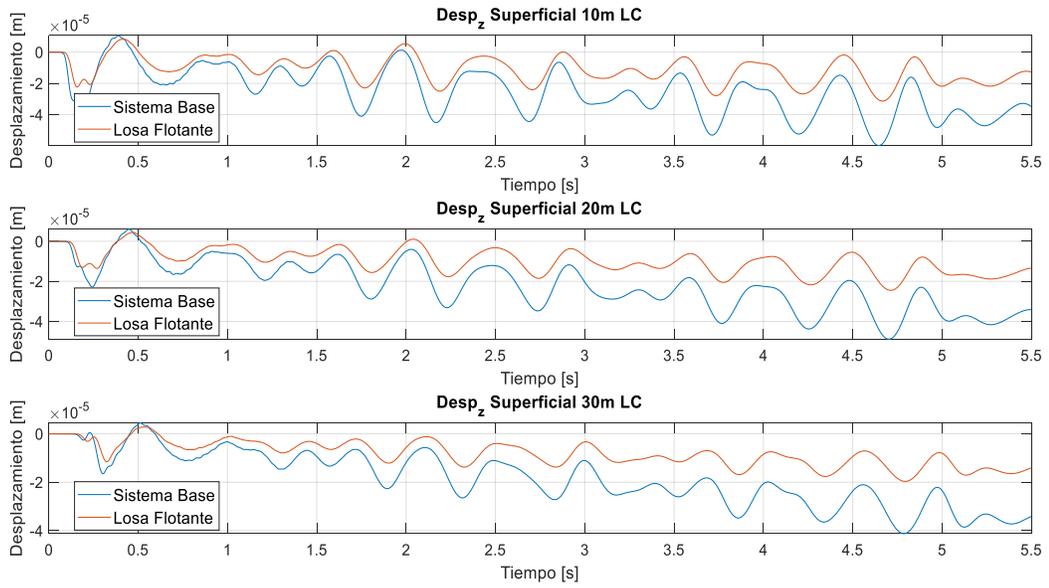


Figura 7.6 Comparación desplazamiento vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.

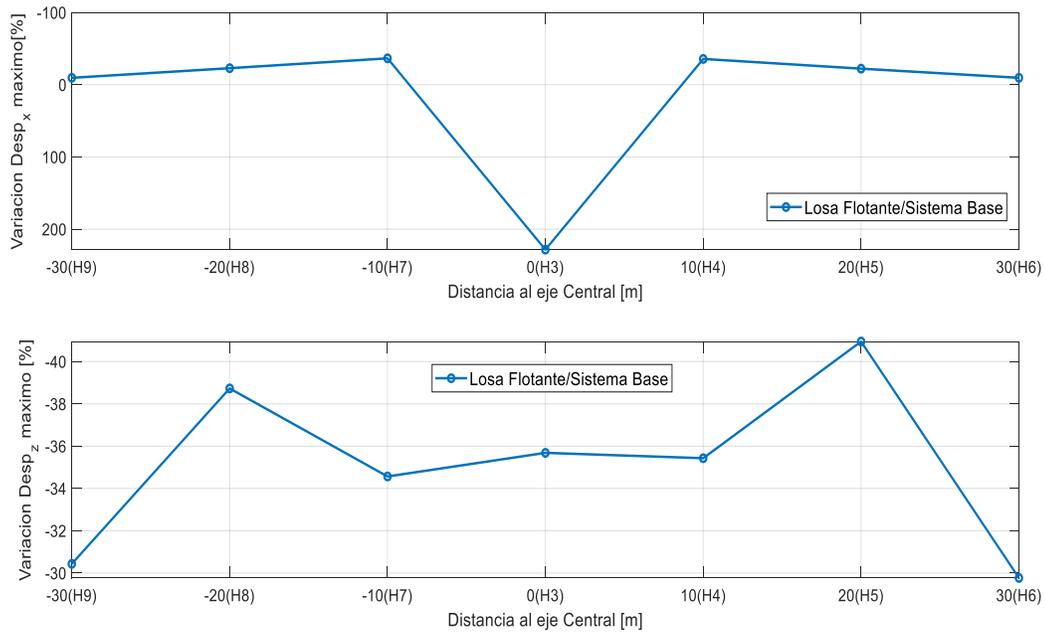


Figura 7.7 Variación porcentual entre desplazamiento máximo en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de Losa Flotante y sistema Base.

7.1.2. Comparación de la Velocidad

La diferencia entre ambos modelos estudiados se puede apreciar de manera más fácil en la velocidad y aceleración vertical de las vibraciones que ocurren en la superficie libre. En la Figura 7. 8 se aprecia una disminución en la amplitud de la velocidad para el caso con manta elastomérica. Esto también es

apreciable en la Figura 7. 9, donde la velocidad vertical en los distintos puntos de control superficiales tiene valores *peaks* menores para el caso de la *Losa Flotante*. También es posible verificar en que ambas figuras, durante el primer segundo (aproximadamente) de oscilación la frecuencia de oscilación en ambos casos es distinta. Se observa mayor frecuencia en el Caso Base. Luego de este tiempo la velocidad en ambos modelos se comporta de manera similar.

La Figura 7. 10 muestra las frecuencias predominantes de la señal de velocidad en superficie libre para los distintos puntos de control. En esta figura se ve claramente que las velocidades predominantes de oscilación se encuentran acotadas entre 1 y 10 Hz independiente del punto de control. Por otra parte, al alejarse de la línea central la energía de la señal va disminuyendo. En esta figura se puede ver que para el caso del sistema con *Losa Flotante* la energía de la señal es siempre menor que en el sistema *Caso Base*, independiente del punto de control y de la frecuencia que se analice. Además, es posible notar que la energía de la señal va disminuyendo con la distancia del punto de control al eje central del túnel. Por ejemplo, se tiene que las componentes poseen un nivel de energía 60% menor en el punto de control **H6** con respecto al punto **H3**. Con esto se puede concluir que el camino recorrido por la onda hace que pierda energía por roce.

La Figura 7. 11 muestra la disminución porcentual que existe entre la velocidad máxima obtenida entre ambos sistemas, tanto en el eje horizontal perpendicular al túnel (eje *x*) y el eje vertical (eje *z*). Tal como se puede apreciar en esta figura hay una disminución en los valores máximos. Para el caso de la velocidad horizontal el punto que más disminuye su valor máximo es el punto central (**H3**) con un 80% menos en la velocidad horizontal. Los puntos más alejados tienen menor variación, correspondiente a un 30% para **H7** y **H4**, casi un 40% para **H8** y **H5** y de un 20% para los puntos extremos. En el caso de la velocidad vertical la velocidad máxima disminuye un 40 a 45% para los puntos **H9**, **H7**, **H3**, **H4** y **H6** un 15% para **H8** y **H5**.

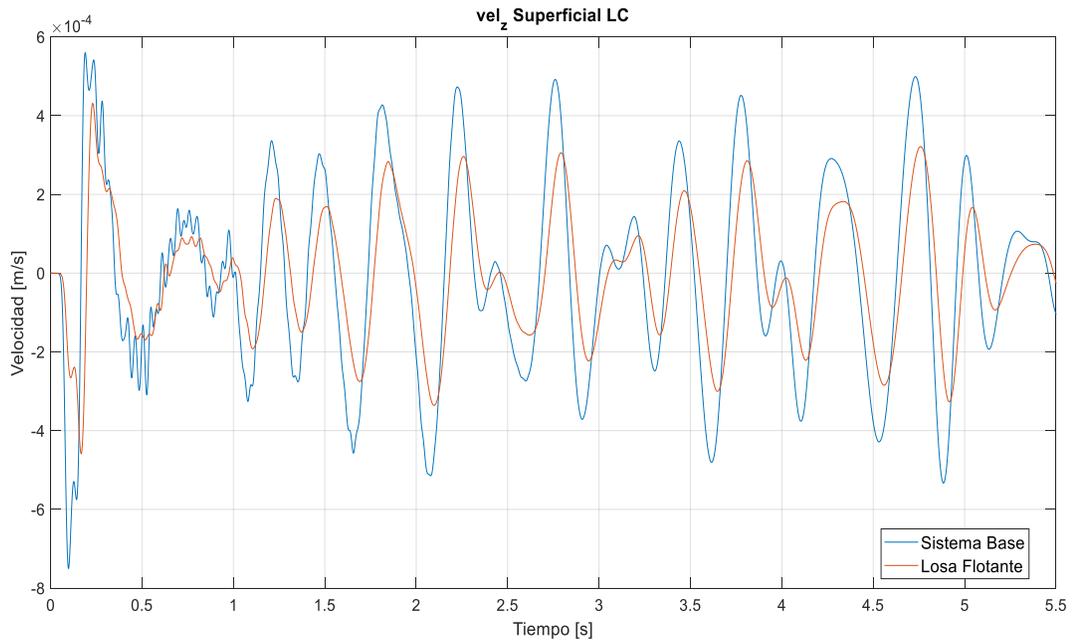


Figura 7. 8 Comparación velocidad vertical en superficie Lc del sistema base y con losa flotante

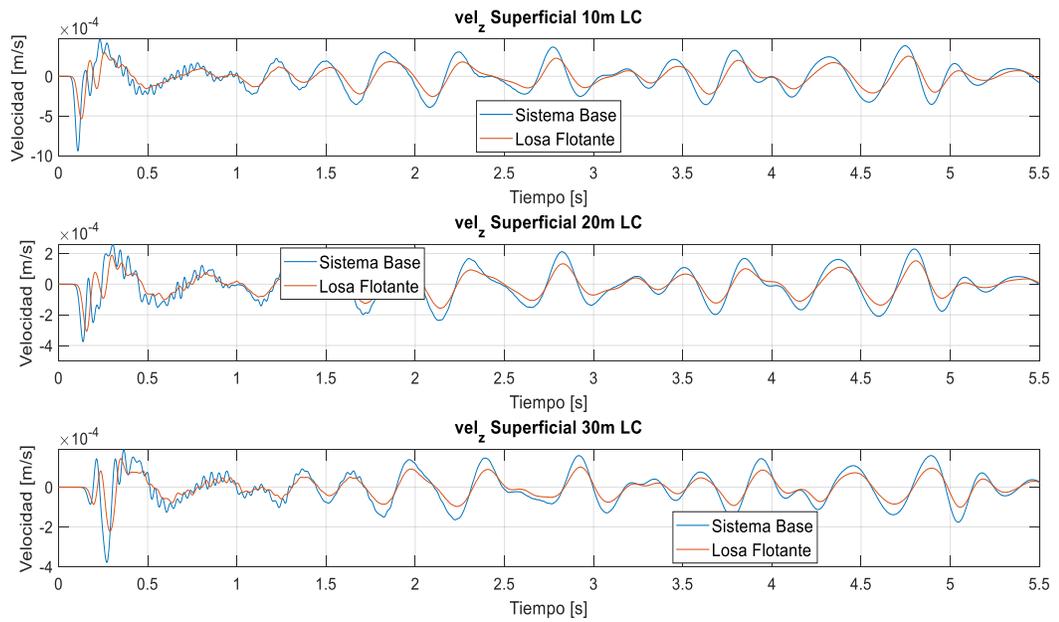


Figura 7. 9 Comparación velocidad vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.

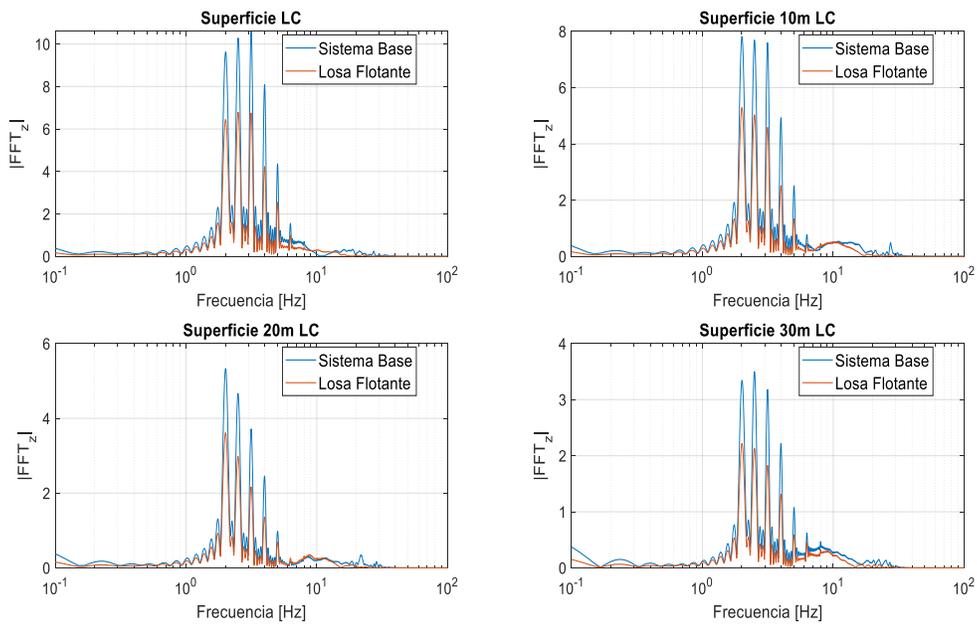


Figura 7. 10 Transformada de Fourier de la Velocidad Vertical en los distintos puntos de control superficiales.

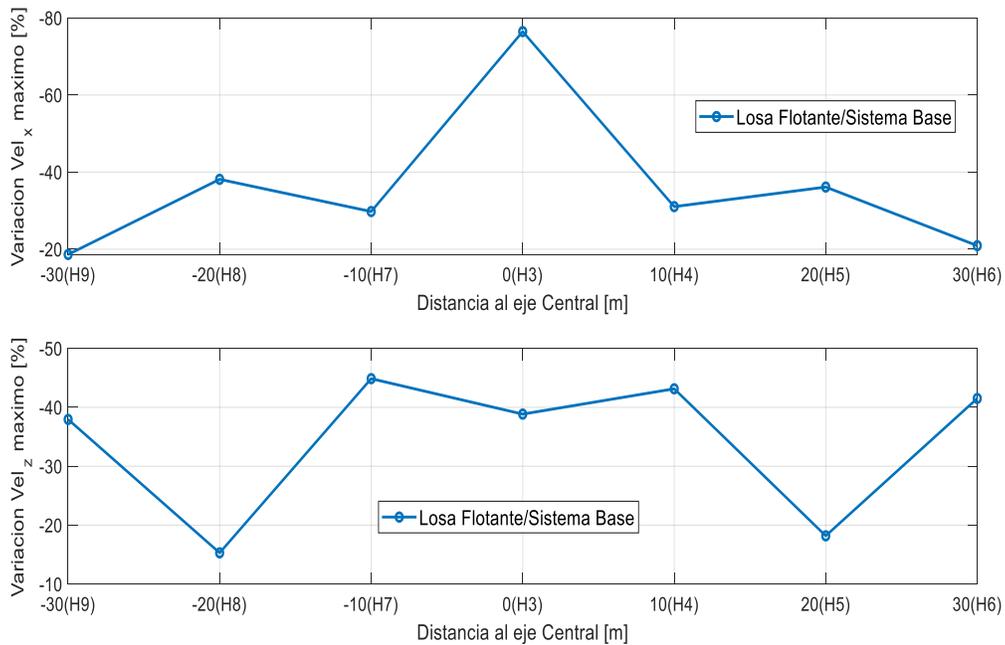


Figura 7. 11 Variación porcentual entre velocidad máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de *Losa Flotante* y sistema Base.

7.1.3. Comparación de la Aceleración

En el caso de la aceleración ocurre algo similar que la velocidad vertical. En las Figura 7. 12 y Figura 7. 13 podemos notar que el caso de *Losa Flotante* posee oscilaciones menores. Esto ocurre más notoriamente en los primeros dos segundos de oscilación. También podemos notar que la frecuencia de oscilación varía entre ambos modelos. Al igual que en el caso de la velocidad, en los primeros segundos se aprecia una mayor frecuencia de la aceleración. Esto ocurre independiente del punto de control; sin embargo, a partir de cierto tiempo ambos modelos se comportan de manera similar con respecto a las frecuencias.

A diferencia del caso de la velocidad, la aceleración posee un rango de frecuencias menos acotado, comprendiendo frecuencias entre los 2 y 40 Hz aproximadamente. A pesar de ser más amplio el rango del espectro, la mayor parte de la energía se concentra entre los 1 y 10 Hz, donde se encuentran los mayores *peaks*. En la Figura 7. 14 se aprecia, también, que la señal del *Caso Base* posee mayor energía en la mayoría de las frecuencias, solamente siendo superada por el sistema de *Losa Flotante* en algunas frecuencias puntuales (a los 10 Hz en el caso del punto sobre la *LC*).

La Figura 7. 15 muestra la razón que existe entre la aceleración máxima obtenida entre ambos sistemas, tanto en el eje horizontal perpendicular al túnel (eje *x*) y el eje vertical (eje *z*). La aceleración horizontal disminuye un 80% para el caso del punto central, cerca de un 40% para los puntos *H7* y *H4*, un 55 a 58% para los puntos *H5* y *H8* respectivamente. En el caso de los puntos extremos la disminución del valor máximo corresponde a un 30% para *H9* y un 38% para *H6*. Por otra parte, para

la aceleración vertical se disminuye un 45% para los puntos **H3** y **H4**, un 38% para **H5**, 35% para **H6**, un 60% para **H7**, un 20% para **H8** y, por último, un 45% para **H9**.

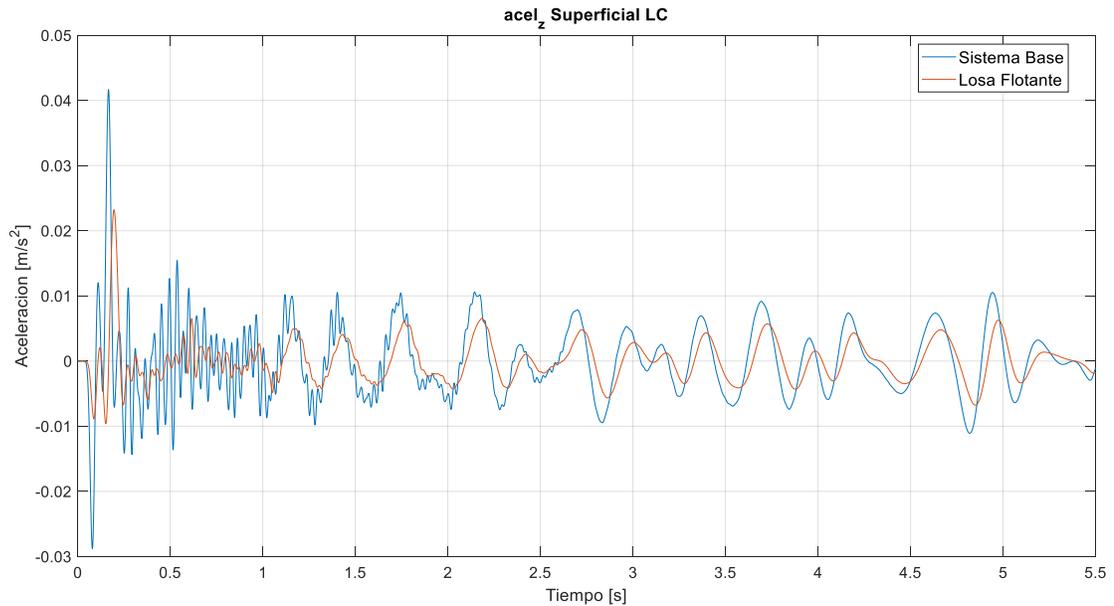


Figura 7. 12 Comparación aceleración vertical en superficie Lc del sistema base y sistema losa flotante.

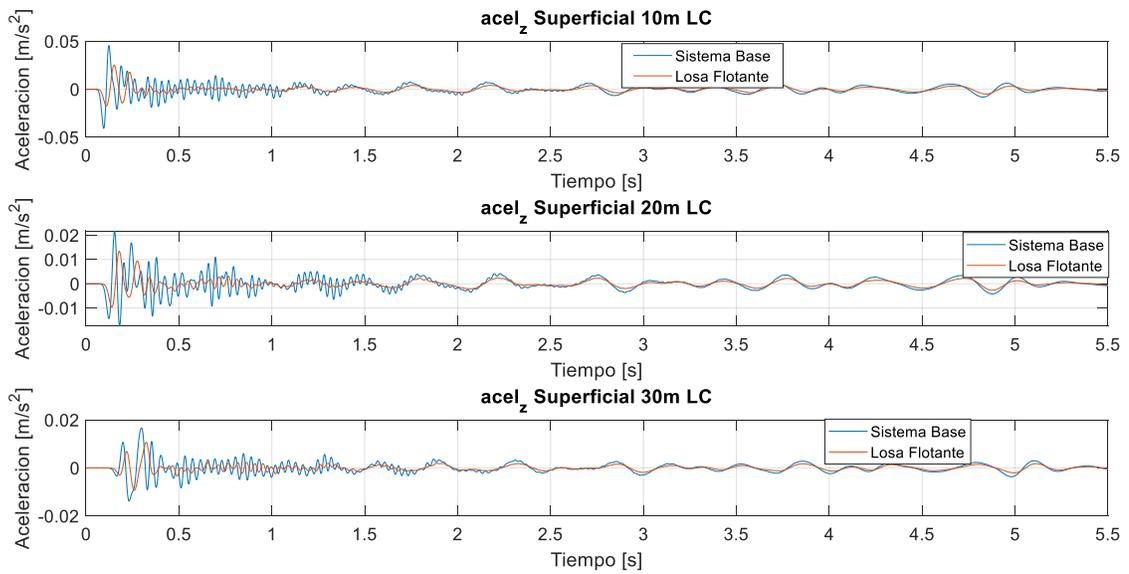


Figura 7. 13 Comparación aceleración vertical para distintos puntos de control en superficie del sistema base y sistema losa flotante.

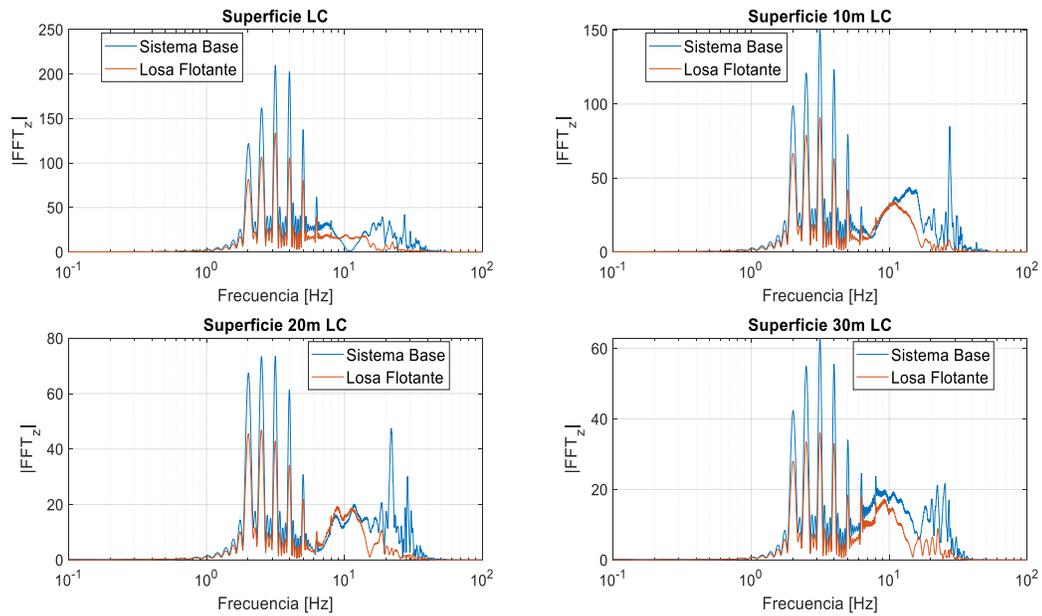


Figura 7. 14 Transformada de Fourier de la señal de Aceleración Vertical en los distintos puntos de control superficiales.

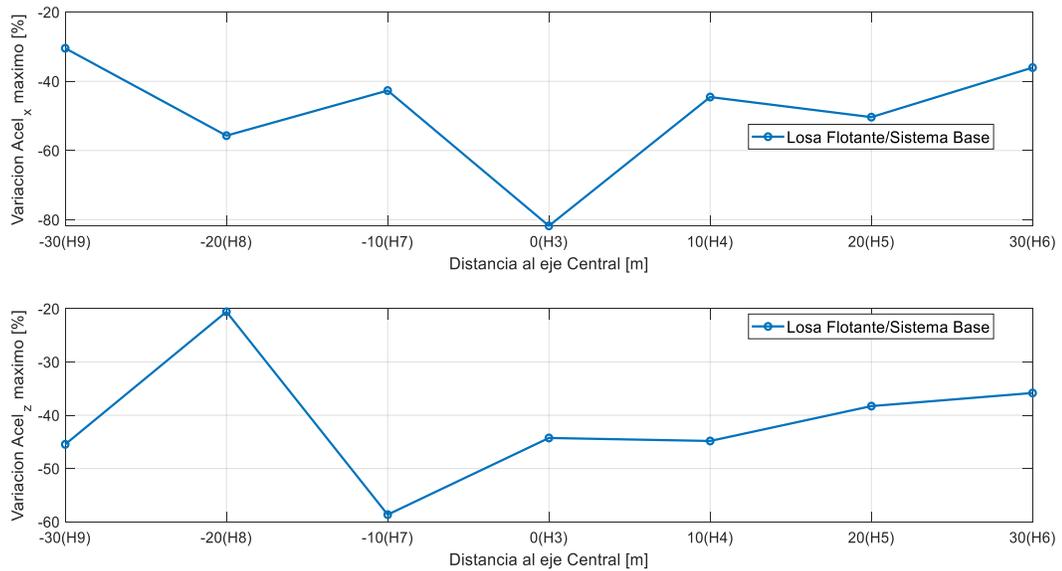


Figura 7. 15 Variación porcentual entre Aceleración máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para sistema de Losa Flotante y sistema Base.

La Tabla 7. 1 muestra un resumen de cómo fue la variación porcentual de los valores máximos de los parámetros medidos en superficie para el caso del sistema con *Losa Flotante* comparados con el *Sistema Base*.

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.

Parámetro	H9	H8	H7	H3	H4	H5	H6
$Desp_x$	-10	-23	-36	230	-36	-25	-10
$Desp_z$	-30	-40	-35	-35	-35	-40	-30
Vel_x	-20	-40	-30	-80	-30	-35	-20
Vel_z	-40	-15	-45	-40	-45	-20	-40
$Acel_x$	-30	-58	-40	-80	-0	-55	-40
$Acel_z$	-45	-20	-60	-45	-45	-40	-35

7.2. Límites de la norma

Tal como se mencionó anteriormente en Chile no existe una norma acerca de las vibraciones, es por lo que se deben recurrir a normas extranjeras para evaluar si las vibraciones se encuentran dentro de los límites deseados. Para efecto de este estudio se considerará el FTA Report No. 0123 (FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, 2018).

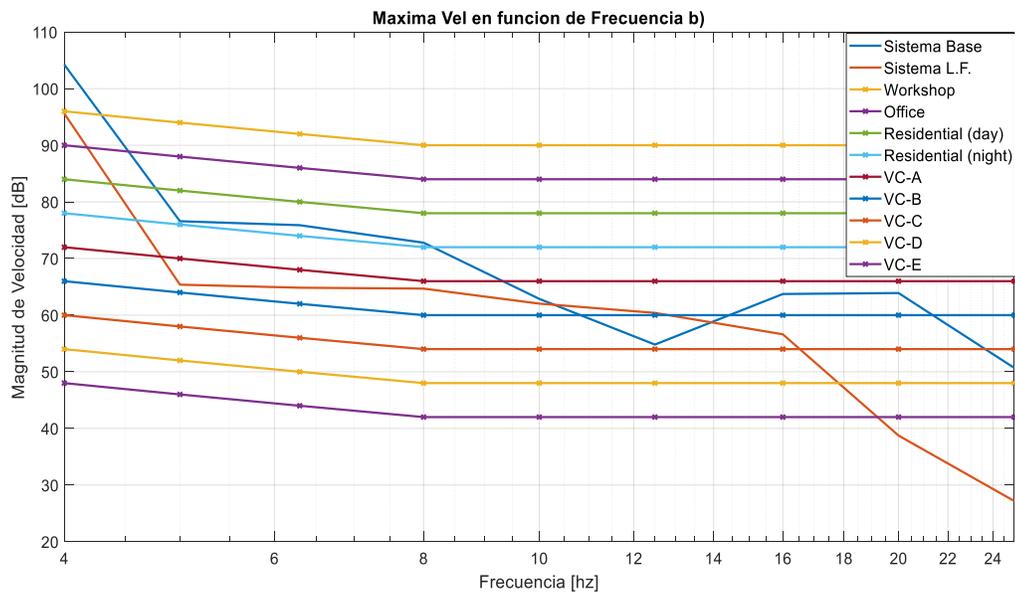


Figura 7. 16 Niveles de vibracion en superficie. Velocidad de referencia $1 \cdot 10^{-6}$ in/s. Rango de frecuencias mostrado 4 – 25 Hz. Comparación entre Sistema Base y Sistema con Losa Flotante.

Tal como se puede ver en la Figura 7. 16 se puede notar que las vibraciones están limitadas según la velocidad y su frecuencia. Se utilizará la norma FTA Report N° 123, en ella se encuentran señalados 9 límites dependiendo del tipo de edificación²⁰ que se encuentra alrededor del estudio en cuestión. Al observar los niveles de vibraciones en la Figura 7. 16 producidos en el punto de control justo en la LC (**H3**) se puede observar lo siguiente:

²⁰ Ver anexo para la explicación de los límites y su significado

- Se elige el punto de control **H3** debido a que es el caso más desfavorable y, por lo tanto, presenta los niveles más alto de vibraciones.
- En el caso del sistema con amortiguamiento existe una disminución en los niveles vibratorios en frecuencias bajas. Sin embargo, en frecuencia correspondiente a 10 y 12,5 Hz se ve un pequeño aumento en comparación con el *Sistema Base*.
- A partir de los 20 Hz existe una disminución importante en el nivel vibratorio, de modo que cumpliría con la normativa de vibraciones para cualquier tipo de edificación en base a las limitaciones impuestas.
- En frecuencias bajas (4 Hz) ninguno de los dos sistemas cumple con las normas para zonas residenciales nocturnas, incluso para zonas de trabajo con talleres no sensibles a vibraciones.
- En el caso del sistema con amortiguamiento se cumple los niveles máximos para una zona residencial diurna para un rango entre 5 y 8 Hz, no así en el *Sistema Base*, donde sobrepasa el nivel máximo de vibración para esta categoría.
- Para frecuencias mayores a 5 Hz el sistema de *Losa Flotante* cumpliría los requisitos para zonas con elementos sensibles a vibraciones (Ver anexo).
- Por otro lado debido a que la carga de entrada está filtrada a partir de los 25 Hz, los niveles vibratorios obtenidos para frecuencias mayores carecen de real sentido, de modo que no se puede decir a ciencia cierta si cumple o no los niveles requeridos, y no fueron analizados en este capítulo.

7.3. Túnel Herradura

A modo de estudio se compara el efecto de la geometría del túnel. Para esto se modela un túnel ficticio del tipo “*Herradura*” lo más similar posible a la geometría original del túnel. Esta geometría es mostrada a continuación. Se procede con la misma metodología estudiada. La principal diferencia entre ambos túneles es que el túnel de tipo *Herradura* carece de la losa las subestructuras como en el caso del túnel con *Contrabóveda*. Esto implica que los elementos de vía están apoyados directamente en el terreno. Si bien es cierto que este tipo de túnel es más simple de construir y de menor costo, también es cierto que tiene menos elementos que permitan mitigar las vibraciones, es justo esto lo que se desea estudiar a continuación. Los *grupos* del modelo FLAC3D corresponden a los siguiente:

- Rock1= Corresponde al suelo que rodea al túnel
- Rock2= Etapa constructiva del túnel
- Rock3= Etapa constructiva del túnel
- Rock4= Etapa constructiva del túnel y posteriormente corresponde a la losa radier bajo los elementos de vía
- FreefielRock1= Condición de borde *Campo Libre* del suelo
- FreefielRock4= Condición de borde *Campo Libre* de la losa radier

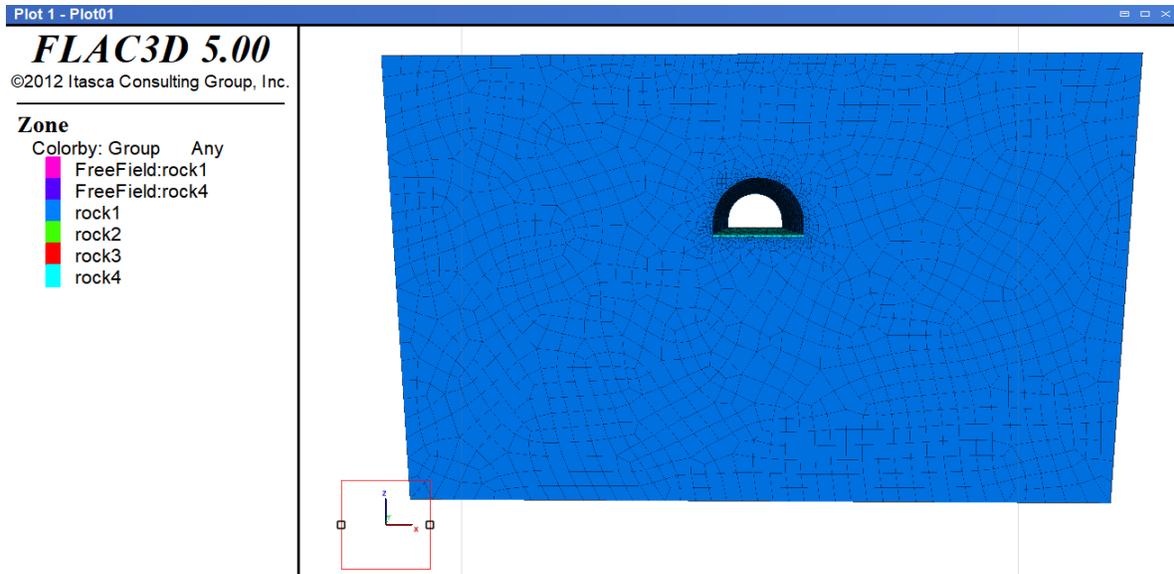


Figura 7. 17 Túnel tipo Herradura. Modelo FLAC 3D

7.3.1. Comparación Desplazamiento

Las Figura 7. 18 Desplazamiento vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura. Figura 7. 18 y Figura 7. 19 muestran los desplazamientos verticales en superficie que ocurren en superficie al ejecutar la carga. Es claro ver que en el caso del Túnel tipo *Herradura* ocurren mayores deformaciones verticales. La magnitud del desplazamiento es mayor en el caso del Túnel de *Herradura* debido a, como se explicó en el inicio de este subcapítulo, la carga se transmite al suelo circundante de forma más directa, con menos elementos de hormigón y sin el revestimiento en la parte inferior del Túnel que mitiguen las vibraciones, las ondas tienen menos pérdidas en el camino hasta la superficie por lo que llegan con mayor energía.

La Figura 7. 20 muestra la variación porcentual que existe entre los desplazamientos máximos obtenidos para ambos túneles. Tal como se puede apreciar en esta figura hay un aumento sustancial en los desplazamientos superficiales para el Túnel de tipo *Herradura*. En el caso del desplazamiento horizontal hay un aumento del 100 hasta un 155% aproximadamente. En el caso de los puntos más extremos hay un aumento mayor que para los casos más cercanos a la *LC*. Para los desplazamientos verticales el aumento es de menor medida y con un patrón diferente. En este caso, se aprecia que los desplazamientos más afectados son los que se encuentran a 10 metros de distancia de la *LC* (**H7** y **H4**), seguido del punto central (**H3**) y luego disminuye hacia los extremos (**H6** y **H9**). El aumento de los valores máximos se encuentra entre un 50% y un 105% aproximadamente.

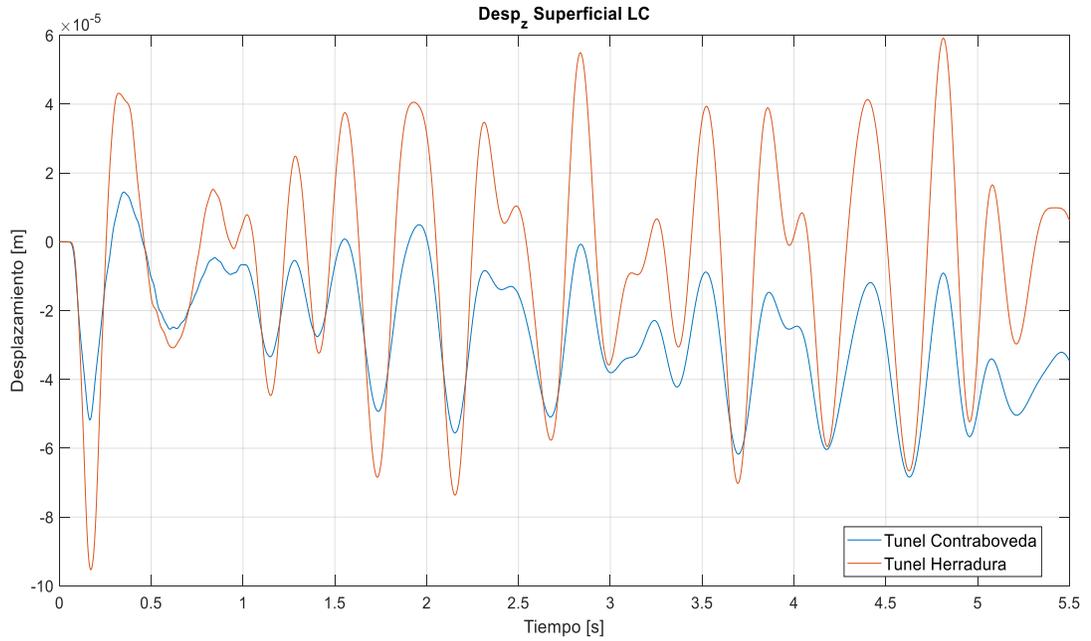


Figura 7. 18 Desplazamiento vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

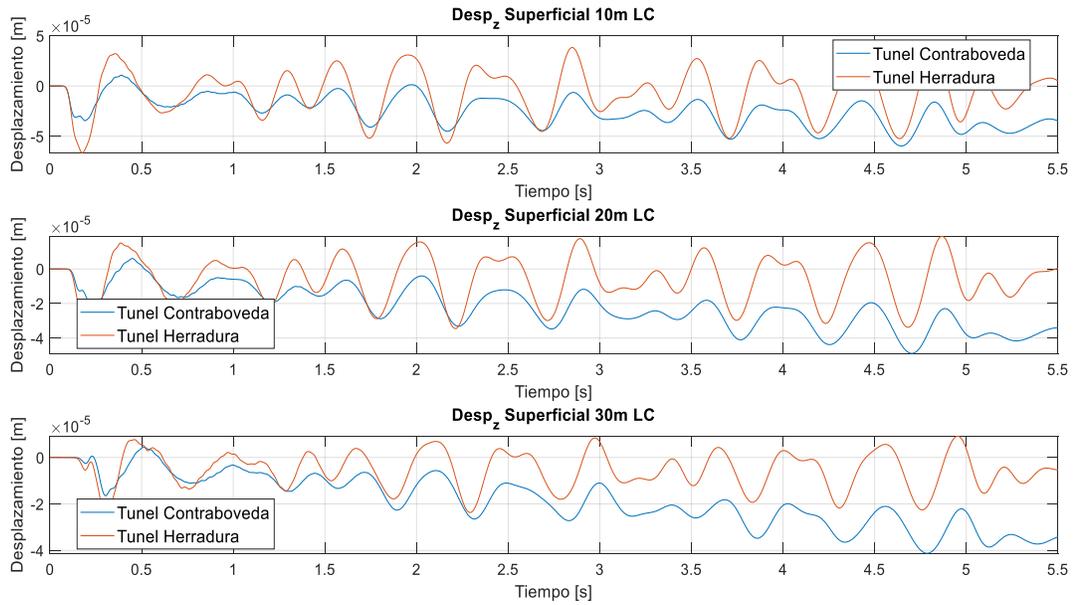


Figura 7. 19 Desplazamiento vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

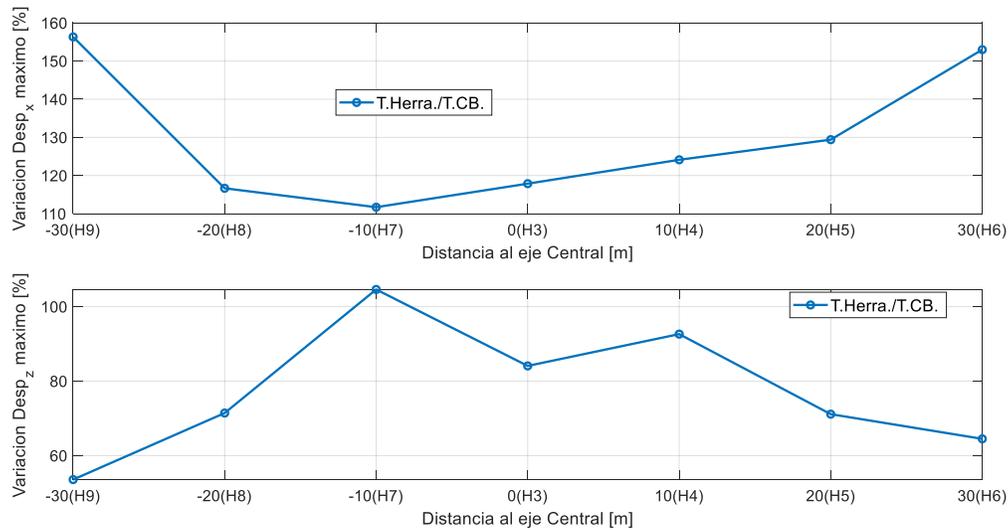


Figura 7.20 Variación porcentual entre Desplazamiento máximo en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Túnel tipo Herradura y Túnel con Contrabóveda.

7.3.2. Comparación de la Velocidad

Es posible apreciar claramente un aumento en la velocidad de las vibraciones superficiales para el caso del túnel tipo *Herradura*. El efecto más claro ocurre en el punto central, donde efectivamente se aprecia que la velocidad es mayor en todas las *crestas* y *valles* de la oscilación. Al alejarse hacia los extremos del modelo la diferencia entre ambos túneles disminuye, pero sigue siendo mayor para el caso del segundo tipo de túnel.

Con respecto a las frecuencias dominantes, no se aprecia un cambio en el comportamiento entre ambos tipos de túneles, ya que el suelo se excita en ambos casos con el mismo contenido de frecuencias *peaks*. Pero se aprecia que en el caso del túnel con *Contrabóveda* la energía de la señal es menor, para la mayor parte de las frecuencias dominantes. Sin embargo, para frecuencias entre los 14 y 20 Hz se ve un pequeño aumento para el caso base (considerando el punto central).

Si se analizan los valores máximos obtenidos en superficie se observa un patrón como el que se ya se ha mencionado. En el caso de la velocidad horizontal se tiene un aumento cercano al 80% para los extremos (**H9** y **H6**), del 60% para una distancia de 20m (**H5** y **H8**), 110 y 120% para los puntos **H4** y **H7** y solamente un 15% para el punto central, es decir, **H3**. En el caso de la velocidad vertical el rango de las variaciones es similar en magnitud. Existe un aumento del 55% y un 20% para los puntos **H9** y **H6** respectivamente. Para el punto **H8** el aumento es del 100%, para **H5** es del 70%, para los puntos **H7** y **H4** es cercano al 45% y para el punto central el aumento del orden del 110%. Nuevamente se ve que el caso del Túnel tipo *Herradura* es un caso más desfavorable.

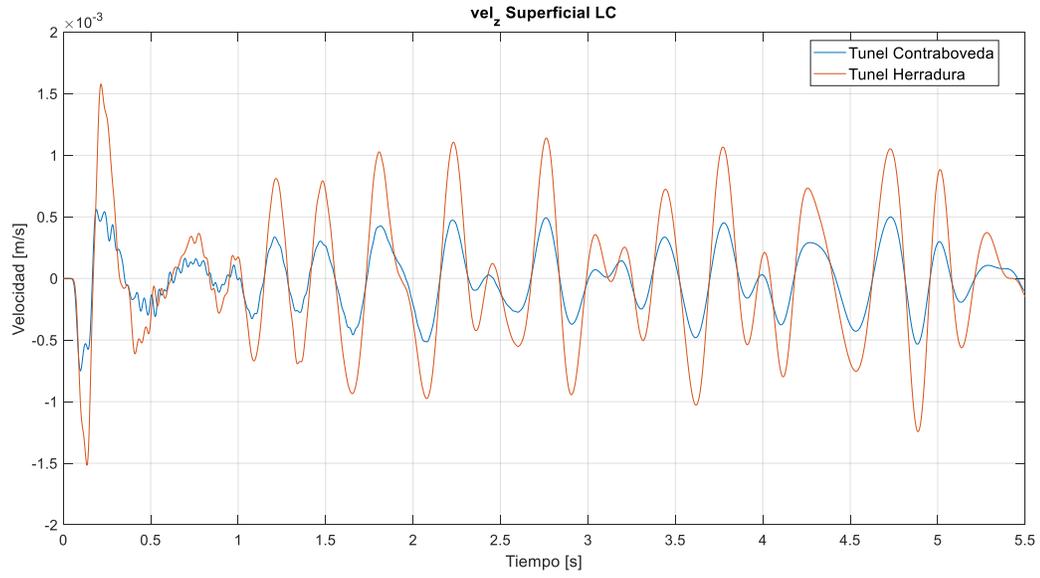


Figura 7. 21 Velocidad vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

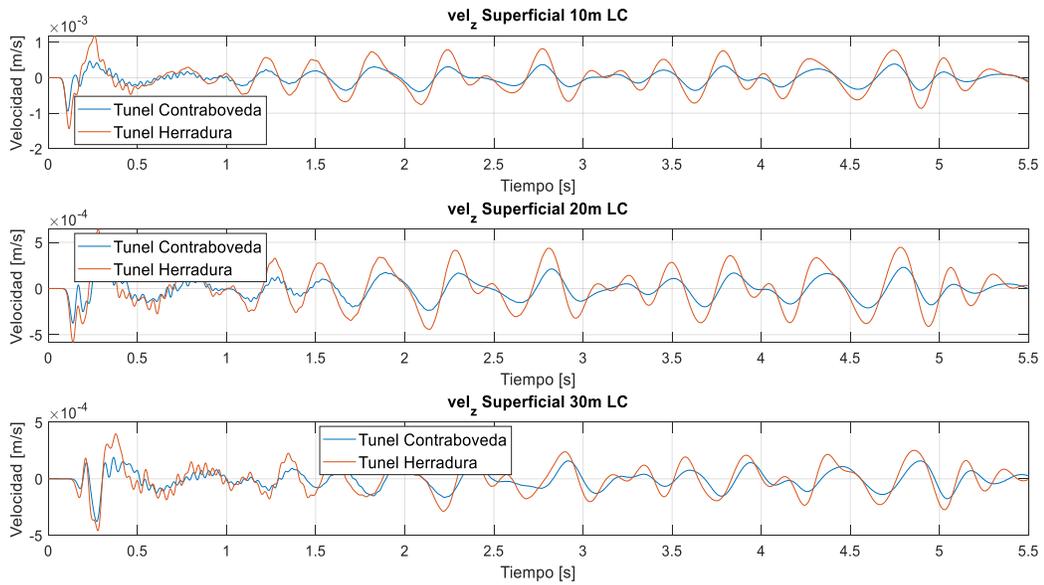


Figura 7. 22 Velocidad vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

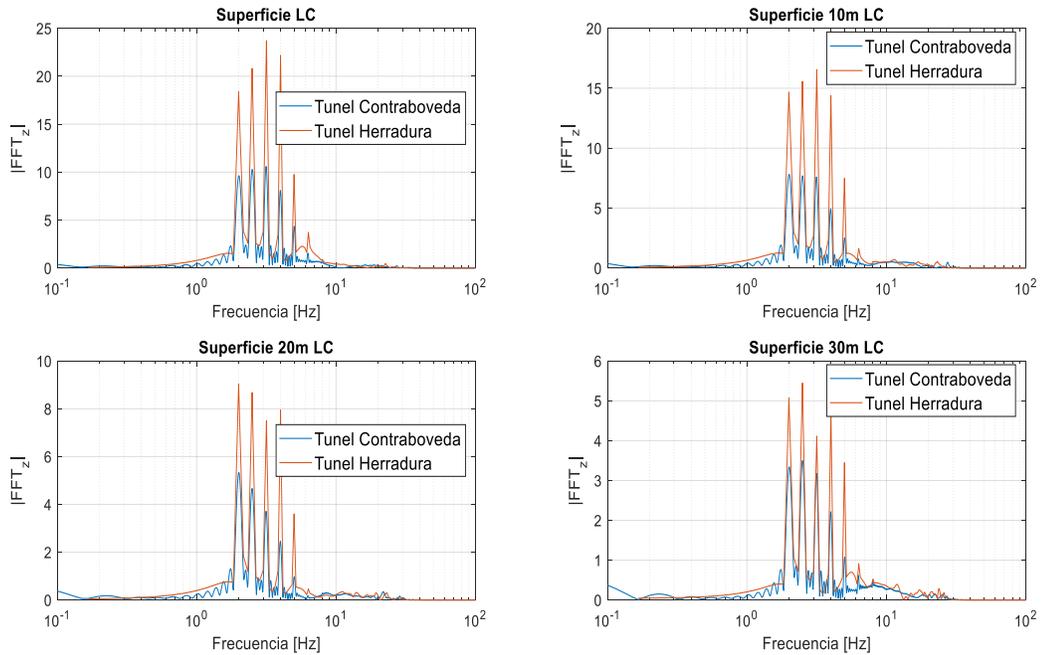


Figura 7. 23 Transformada de Fourier de la Velocidad Vertical en los distintos puntos de control superficiales. Comparación Túnel con Contraboveda y Túnel tipo Herradura.

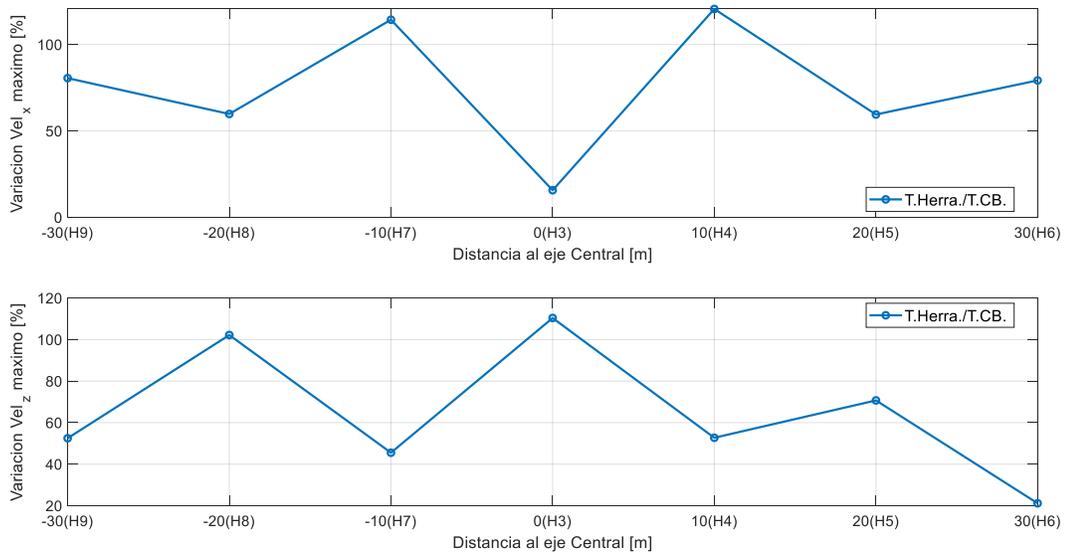


Figura 7. 24 Razón entre Velocidad máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Túnel tipo Herradura y Túnel con Contraboveda.

7.3.3. Comparación de la Aceleración

En este caso el comportamiento es similar que la velocidad, pero las diferencias son levemente menores, donde incluso para los puntos alejados, es decir, los puntos **H9** y **H6**, la diferencia entre ambos modelos es muy baja. El comportamiento entre ambos modelos es similar, para los primeros

dos segundos, se ven oscilaciones a mayores frecuencias, mientras que, pasado este tiempo, las frecuencias altas no se aprecian, es decir, tienen un comportamiento transiente.

La Figura 7. 27 muestra las frecuencias predominantes de la señal de aceleración vertical de ambos modelos. En esta figura no se aprecian diferencias en las frecuencias predominantes, en las que la energía de la señal del modelo de Túnel tipo *Herradura* es mayor en casi todos los puntos de control y para casi todas las frecuencias. Para el punto **H3** (gráfico superior izquierdo de la Figura 7. 27) se aprecia mayor energía para las frecuencias de 16, 18 y 27 Hz. en el caso del punto de control **H4** (gráfico superior derecho de la Figura 7. 27) se observa mayor energía en el túnel con *Contrabóveda* para las frecuencias de 13 y 27 Hz. En el caso del punto **H5** (gráfico inferior izquierdo de la Figura 7. 27) esto ocurre para las frecuencias 21 y 27 Hz. y, por último, para el punto de control **H6** (gráfico inferior derecho de la Figura 7. 27) solamente ocurre para la frecuencia de 13 Hz.

El aumento de la aceleración máxima registrada para los distintos puntos de control de ambos modelos también permite deducir que el caso de túnel con *Contrabóveda* permite disipar mejor las aceleraciones que un túnel tipo *Herradura*. Para las aceleraciones horizontales registradas en el modelo de túnel *Herradura* se aprecia un aumento del 65% y del 35% con respecto al sistema *Base* para los puntos **H9** y **H6** respectivamente (a 30m), un aumento del 25 y 45% aproximadamente para los puntos **H8** y **H5** respectivamente. Para los puntos situados a 10 metros de la *LC* (**H7** y **H4**) es donde se ven mayormente amplificadas los resultados. En estos casos el aumento corresponde al 90% y 140% respectivamente. Para el caso central, es decir, punto **H3** se ve una disminución del 30% de la aceleración *peak*. Para los valores verticales el aumento es de menor magnitud. Para los puntos **H9** y **H6** el aumento es del 15 y 60% respectivamente. Para los puntos **H8** y **H5** el aumento corresponde al 45 y 1%. Para los puntos **H7** y **H4** la aceleración máxima crece un 10 y un 25% respectivamente. Y, finalmente, el punto central **H3** crece un 40%.

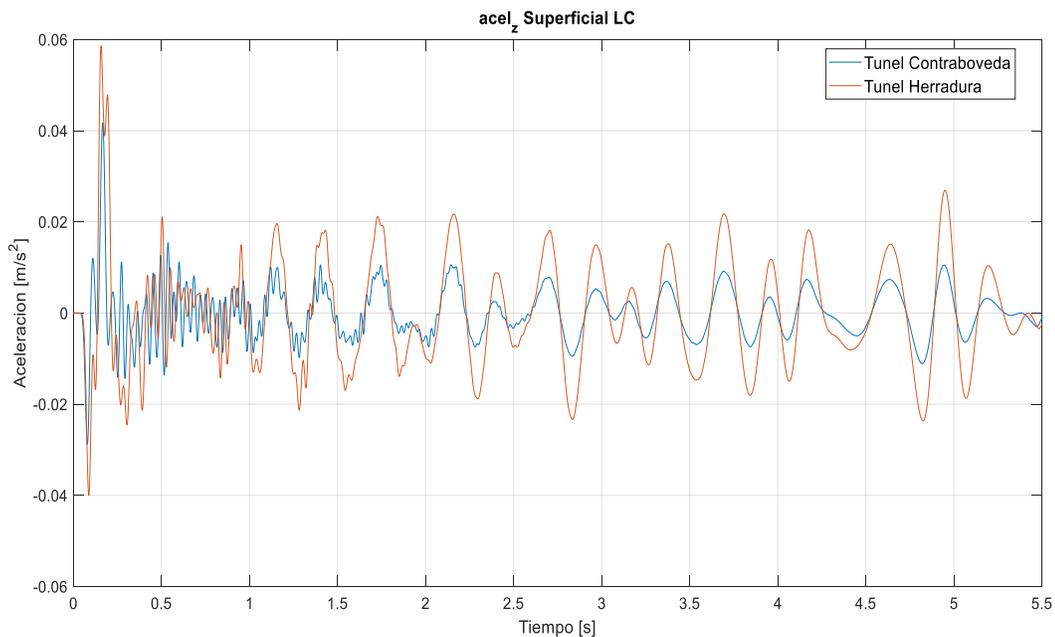


Figura 7. 25 Aceleración vertical en la línea central del túnel en superficie. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

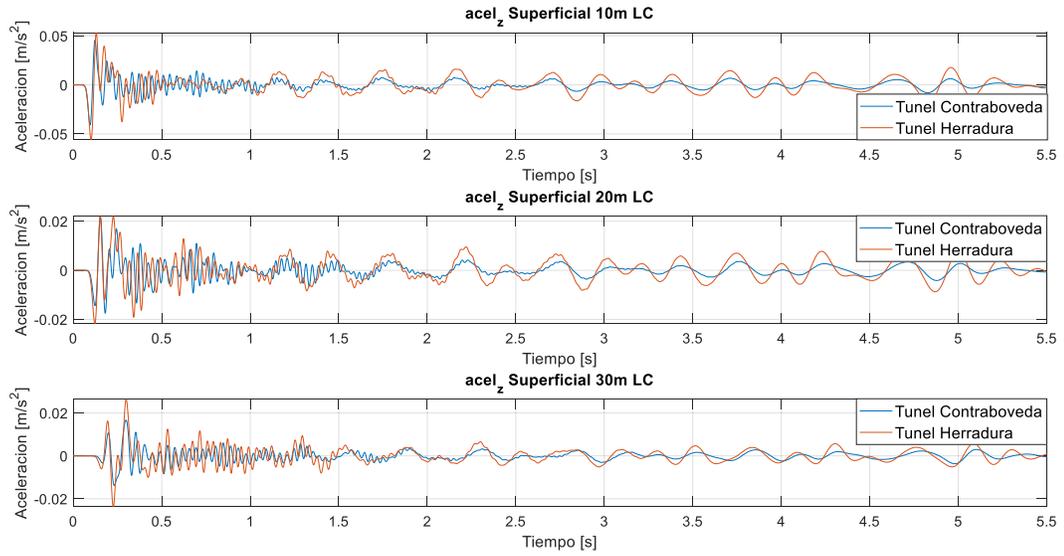


Figura 7. 26 Aceleración vertical en superficie alejado de la LC. Comparación Túnel con Contra Bóveda y Túnel Herradura.

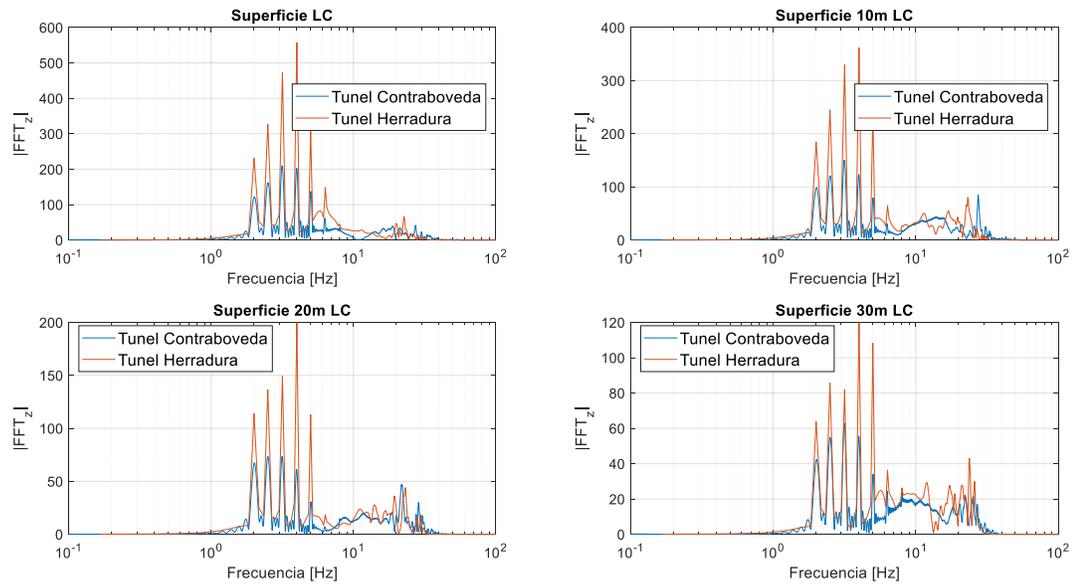


Figura 7. 27 Transformada de Fourier de la Aceleración Vertical en los distintos puntos de control superficiales. Comparación Túnel con contrabóveda y Túnel tipo Herradura.

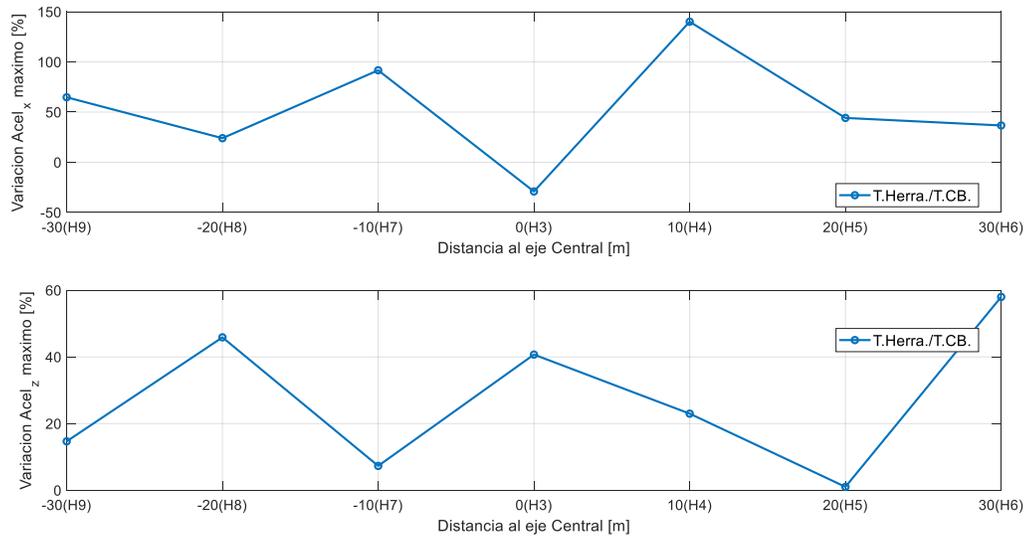


Figura 7. 28 Razón entre Aceleración máxima en eje x (arriba) y eje z (abajo) para Túnel tipo Herradura y Túnel con Contrabóveda.

La Tabla 7. 2Tabla 7. 1 muestra un resumen de cómo fue la variación porcentual de los valores máximos de los parámetros medidos en superficie para el caso del Túnel tipo *Herradura* comparados con el Túnel con *Contrabóveda*

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.

Parámetro	H9	H8	H7	H3	H4	H5	H6
$Desp_x$	156	116	112	117	125	130	155
$Desp_z$	55	80	105	85	90	70	65
Vel_x	80	60	114	15	120	60	80
Vel_z	55	100	45	110	53	70	20
$Acel_x$	65	25	90	-30	140	45	45
$Acel_z$	15	45	10	40	25	1	58

5.6. Límites de la norma

Se comparan la respuesta de ambos túneles comparados y sus niveles de vibraciones para verificar si cumplieran o no con las normativas. Para esto se grafican los decibeles de velocidad en la respuesta en superficie producidas en la *LC* (punto *H3*). Se utilizan tercio de octava para las frecuencias de estudio. Los resultados se muestran en la Figura 7. 29. Según lo mostrado en esta figura podemos concluir lo siguiente:

- El Túnel tipo Herradura no cumpliría muy bien los requisitos impuestos por esta norma para zonas con talleres y lugares de trabajo no sensibles a vibraciones, para un rango de frecuencias de 4 a 8 Hz.
- Para el caso particular de la frecuencia de 4 Hz ninguno de los dos modelos cumple las normas para zonas residenciales.

- El caso de Túnel con *Contrabóveda* cumple requisitos para zonas residenciales durante el día, pero en frecuencias menores a 8 Hz no cumpliría para zona residencial durante la noche, no así el túnel tipo *Herradura* que cumpliría los requisitos de vibraciones para zonas residenciales en horario diurno a partir de los 10 Hz.
- Por otro lado, es posible apreciar que para frecuencias entre 16 y 20 Hz el túnel tipo *Herradura* tiene valores de vibraciones menores que en el caso base. Sin embargo, ambos cumplirían los requisitos para zona residencial tanto en horario diurno como nocturno.
- En ambos modelos se aprecia una disminución de los niveles vibratorios a partir de los 10 Hz.

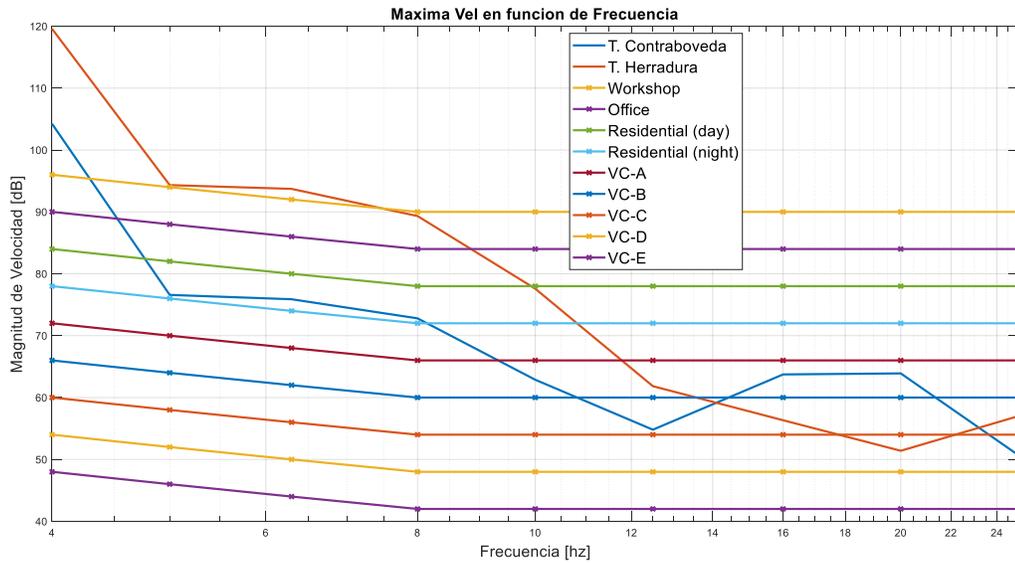


Figura 7. 29 Niveles de vibracion en superficie. Velocidad de referencia $1 \cdot 10^{-6}$ in/s. Rango de frecuencias mostrado 4 – 25 Hz. Comparación entre Túnel con Contrabóveda y Túnel tipo Herradura.

8. Conclusiones

El objetivo principal de esta memoria es comparar las vibraciones que se generan en superficie de dos modelos diferentes ante una carga que simule el paso del tren por las vías de Metro en la zona norte de Santiago, específicamente en la zona de la comuna de Quilicura. Para ello se modela los túneles de Metro con una manta elastomérica bajo el radier de apoyo de las vías y se compara con una situación base sin este sistema de atenuación de vibraciones. Antes de comparar los efectos de amortiguamiento de esta manta se estudian las vibraciones generadas en el sistema base, es decir, sin este amortiguamiento proporcionado por la manta elastomérica. Con estos modelos analizados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para los niveles estudiados de amortiguamiento del suelo (2,3 y 5%) no se aprecia mayor diferencia en los resultados, salvo una diferencia de tiempo en los cálculos computacionales.
- Para el caso de amortiguamiento de 2 y 3% no se encontraron diferencias significativas en los resultados y si se comparan con el de 5%, cualquiera de los dos casos es un escenario más conservador, ya que las ondas generan mayores perturbaciones en la superficie. Por lo tanto, se optó por considerar un amortiguamiento de suelo del 2% para este estudio, debido a que implica menores tiempos de cálculos computacionales y es un escenario menos conservador.
- Al contrario de lo que se esperaba, en superficie tanto en el eje central del túnel como a 10 m alejado de éste, la influencia del tren es la misma. Si bien en la zona que está justo abajo del túnel se generan mayores perturbaciones que en la clave del túnel, el camino que deben seguir las ondas para llegar a la superficie desde la base del túnel disipa la suficiente energía para hacer que ambos casos sean similares (ver

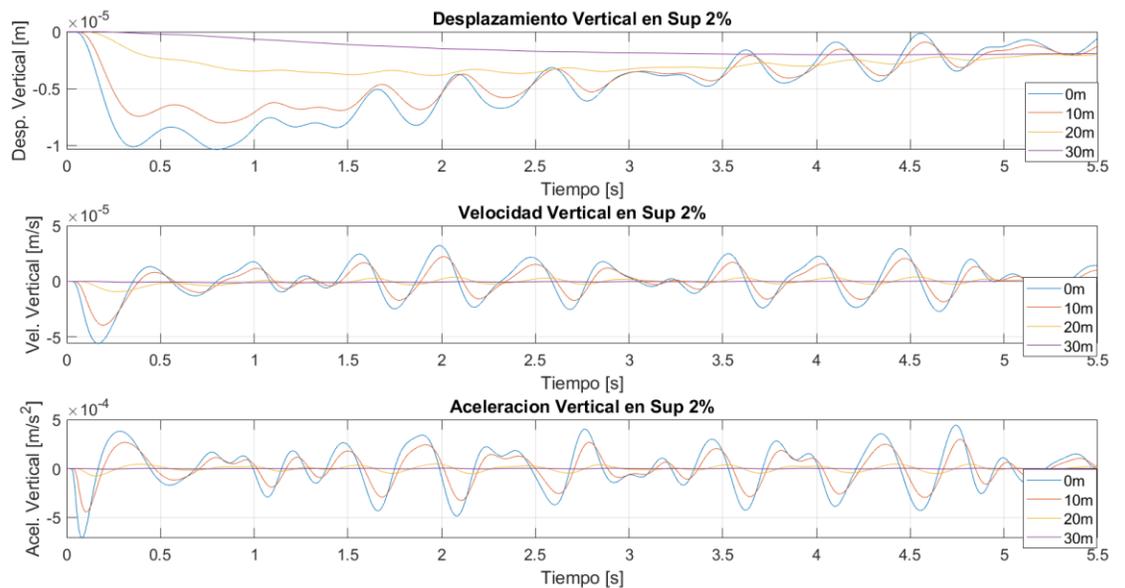


Figura 6. 23). En consecuencia, aplicar medidas que impliquen que las ondas deban recorrer mayores distancias traen como consecuencias una disminución notable en las vibraciones.

- En caso de que se tengan modelos con tamaños de elementos más pequeños no conlleva a obtener resultados mucho más precisos que un modelo de elementos de mayor tamaño. La principal diferencia entre ambos modelos recae en las frecuencias de interés de las vibraciones estudiadas. Para este caso de estudio se observa que no es necesario un mayor refinamiento del mallado ya que se desean estudiar frecuencias acotadas en un rango de 25 [Hz]. Frecuencias mayores implican problemas de ruido inducido (entre 60 y 80 Hz) lo cual fue omitido en este estudio.

Con respecto a la modelación de las cargas del tren

- Para tener resultados más realistas en este tipo de estudios es necesario realizar mediciones en las estructuras del túnel, por ejemplo, las vibraciones que se producen en la losa de la subestructura de las vías. Esto trae como consecuencias poder quitar elementos en los modelos de estudio como sería los rieles y los Pads. Estos elementos al ser tan pequeños implican un incremento considerable en los tiempos de cálculos. Sin embargo, ya que el fin de esta memoria es ver el efecto de un amortiguador bajo esta losa y en las mismas condiciones, la carga modelada en Matlab debido a las irregularidades de las vías implica un ejercicio que permite un mayor entendimiento de las vibraciones.
- Los *pads* aíslan las vibraciones que se transmiten desde el riel hacia los elementos que se encuentran abajo, además de modificar el contenido de frecuencias de las cargas.
- En el caso de no contar con la suficiente información de los trenes, es posible generar una carga en el tiempo causada por la deformación estática en los rieles por peso total de un carro repartido entre las ruedas y el eje. Esta es una buena aproximación debido que las ruedas generan casi en su totalidad las vibraciones. Sin embargo, este método posee un contenido de frecuencias más acotado que el modelo dinámico realizado en este estudio. De ser necesario este tipo de carga se recomienda ver la literatura (Estudio numérico de vibraciones provocadas por el tráfico ferroviario en túneles en el dominio del tiempo: análisis geotécnico, validación experimental y propuesta de soluciones (Fernandez, 2014) y Reducción de vibraciones producidas por ferrocarriles mediante bloques de hormigón enterrados junto a la vía (“Wave Impeding Block”) (Mallafré, 2015)).
- Si bien es cierto que las condiciones no son las mismas en ningún caso de estudio. CAF concluye que el suelo alrededor del túnel tiene poca influencia en la carga de los trenes (CAF, INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO, 2015). Esto sirve para validar la carga que se está modelando en Matlab, al ser independiente del tipo de suelo circundante. Esta carga fue modelada solo con el movimiento de los elementos de los distintos carros de un tren generado a causa de irregularidades en el riel. Se omite la deflexión causada por el peso del tren debido a que no se cuenta con las propiedades de los *pads* de las líneas de Metro.

Con respecto al sistema de control

- El sistema de control de las vibraciones (manta elastomérica) implica directamente en la disminución de los parámetros estudiados en los puntos de control, sobre todo en el eje vertical y perpendicular al túnel, al transmitir menor fuerza hacia el suelo que rodea el túnel.
- La manta elastomérica es capaz de disminuir los desplazamientos verticales en superficie desde un 30 hasta un 40% aproximadamente. En cuanto a los desplazamientos horizontales perpendiculares al túnel esta disminución corresponde entre 10 a 30%. En el caso del punto central existe un aumento notable del desplazamiento horizontal.
- Tanto las aceleraciones como las velocidades disminuyen su magnitud con respecto al sistema *Base*. Tanto las velocidades como las aceleraciones horizontales pueden ser disminuidas desde un 20 hasta un 80% en superficie. Las velocidades verticales varían desde un 10 hasta un 50% menor que en el caso *Base*. En cuanto a la aceleración vertical la disminución se encuentra entre un 20 y un 60% dependiendo de la distancia al eje central del túnel.
- El contenido de frecuencias predominantes de la velocidad y aceleración no varía con el sistema de control, sino más la cantidad de energía que transmite en la señal completa.

- La losa flotante disminuye la energía de la aceleración vertical de manera más efectiva para un rango de 10 a 25 Hz. para el rango entre 1 y 10 Hz la disminución de la manta elastomérica es apreciable, pero es en menor medida que el rango anteriormente dicho.
- La señal de la velocidad vertical en el espacio de las frecuencias (Transformada de Fourier) muestra una disminución en la energía para el caso del sistema *Losa Flotante*. Esto se aplica para el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz.

Con Respecto al tipo de túnel

- Construir túneles con contra bóveda es un método de control de vibraciones hacia la superficie, esto se debe a que las vías, que es donde se generan las vibraciones, se encuentran más aisladas que en el caso de que las vías se encuentren más cerca del suelo, como en el caso de un túnel tipo *Herradura*. Con esto se concluye que la losa de subestructura es un buen aislante de vibraciones, debido a la masa que ésta posee.
- El Túnel tipo *Herradura* puede tener deformaciones verticales superficiales producto de las vibraciones de hasta un 100% mayores con respecto a un túnel con *Contrabóveda*. La velocidad vertical puede ser hasta 110% mayor y la aceleración vertical hasta un 50% más grande.
- Túnel tipo *Herradura* no cumpliría bien los requisitos de la norma para limitar las vibraciones para una zona residencial en un rango de frecuencias de 4 a 10 Hz.
- Existe una disminución del nivel vibratorio de ambos modelos a partir de los 10 Hz. A partir de esta frecuencia, ambos modelos cumplirían los requisitos para zonas residenciales.
- Túnel tipo *Herradura* aísla de mejor manera la velocidad que el túnel con *Contrabóveda* en un rango muy acotado de 16 a 20 Hz.
- Existe un aumento de los valores de todos los parámetros estudiados (desplazamientos, velocidad y aceleración) en todos los puntos de control superficiales para el caso del túnel tipo *Herradura*. Las variaciones pueden ser hasta de un 150% mayores que en el caso *Base*.
- Las frecuencias predominantes de las señales de velocidad y aceleración vertical son similares entre ambos modelos, sin embargo, poseen mayor energía en el caso de túnel de *Herradura*.

9. Bibliografía

- 3590, I. (2005). *Railway applications- Acoustic-Measurements of noise emitted by railbound vehicles*. Switzerland: ISO.
- Acevedo Plaza, M. (2020). *Modelo de velocidades de la Cuenca De Santiago y estimación de su respuesta sísmica*. Santiago.
- Alarcón, E., Hermanns, L., & Fraile, A. (2000). Estructuras sometidas a acciones dinámicas. En E. Alarcón, L. Hermanns, & A. Fraile. Barcelona: Cimne.
- Ammann, H. B. (1987). *Vibrations in structures. Induced by man and machines*. Zurich.
- ARCADIS. (2013). *Plano túnel L3-ID-02-PLA-431-TU-003*. Santiago.
- Arcadis, W. . (2017). *PL3-ID-E002-PLA-000-TR-00107-R1*. Santiago.
- ArcelorMittal. (s.f.). *ArcelorMittal Europe*. Obtenido de <https://rails.arcelormittal.com/tipos-rieles/carril-de-transporte/norma-europea/carril-uic60-60e1>
- Braja, D. M., & Ramana, G. V. (2011). *Principles of soil dynamics*. Stampford.
- CAF. (2012). *INTERFACE MATERIAL RODANTE CON OBRAS CIVILES (P63-IB-0004-ESF-000-MB-0002)*. Madrid.
- CAF. (2015). *DESCRIPCIÓN DE CAJA (P63-ID-0084-ETQ-C97-MR-35200)*. MADRID.
- CAF. (2015). *HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO DE BOGIE (P63-ID-0084-MCA-B93-MR-01000)*. MADRID.
- CAF. (2015). *INFORME DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZA DE CONTACTO*. Madrid.
- CAF. (2015). *INFORME DE CALCULOS DE PESO (P63-ID-0084-MCA-C93-MR-11000)*. MADRID.
- CAF. (2015). *METRO DE CHILE MATERIAL RODANTE Y CBTC UTO LÍNEA L63 (P63-ID-0084-MCA-B93-MR-02100)*. MADRID.

- CAF. (2015). *PLANOS DE BOGIES (P63-ID-0084-PLA-C00-MR-85300)*. Madrid.
- Carman, R. (2012). *Floating track Slab system for reducing Ground-Borne Noise and Vibration from Rail Vehicles*. California.
- CI5223. (2019). *Diseño de Albañilería Estructural*. Santiago de Chile.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Delft (Holanda): MRT-PRoductions.
- Fernandez, J. (Enero de 2014). ESTUDIO NUMÉRICO DE VIBRACIONES PROVOCADAS POR EL TRÁFICO FERROVIARIO EN TÚNELES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO: ANÁLISIS GEOTÉCNICO, VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES. *Tesis Doctoral*. Coruña, Coruña, España.
- FTA. (2006). *Transit noise and vibration impact assessment*. Washington DC.
- Garburg, T. J. (2007). Measurements and investigations at the floating-trac-bed system in North-South Tunnel in Berlin. *International Workshop on Railways Noise*. Munich.
- Godoy, C., González, L., & Sáez, E. (2015). *Importancia de la velocidad de onda de corte y del periodo predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago*. Santiago.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. USA.
- Layera, S. (2018). *BACK ANALYSIS DEL MODELO NUMÉRCIO UTILIZADO PARA EL DISEÑO DE LOS TÚNELES INTERESTACIÓN DE LA LÍNEA 3 DEL METRO DE SANTIAGO*. Memoria para optar al título de ingeniera civil, Universidad de Chile.
- Maldonado, Y. (s.f.). *Geología, ramas y aplicaciones*. Obtenido de <https://geologiaweb.com/geofisica/metodos-sismicos/ondas-sismicas/>
- Mallafre, J. (2015). *Reduccion de las vibraciones producidas por ferrocarriles mediante bloques de hormigon enterrado junto a la vía*. Barcelona.
- Melis, M. M. (2002). *Ferrocarriles metropolitano Tranvías, metros ligeros y metros convencionales*. Madrid: CANALES Y PUERTOS COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS.
- Metro. (2019). *Metro.cl*. Obtenido de Metro.cl: <https://www.metro.cl/tu-viaje/plano-de-red>
- Montalvo, T. y. (2007). EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES DEL SUELO CAUSADAS POR TRENES SUBTERRÁNEOS USANDO ELEMENTOS FINITOS. *INT. DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL*, 79-88.
- RENFE. (2015). *ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE SUMINISTRO RUEDAS DEL MATERIAL RODANTE*. Barcelona.
- Valenzuela, G. (1978). *Suelo de fundación del gran Santiago*. Santiago.
- Vargas, D. H. (2015). *Propuesta de norma de ensayos de cargas ciclicas sinusoidales para hormigones a compresion diametral*. Valdivia.
- Web Plot Digitizer. (s.f.). Obtenido de <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/index.html>

Wikipedia. (24 de Agosto de 2019). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_de_Santiago#L%C3%ADnea_1

Wilson, G. (1977). *Use of floating-slab track bed for noise and vibration abatement*.
Transportation Research.

Wolfe, S. (1995). Floating slab design and performance for embedded in street track. *American Public Transit Conference*. San Francisco.

Woods, R., Richart, F. E., & Hall, J. R. (1970). vibrations of soils and foundations. *Prentice-hall international series in theoretical and applied mechanics*. New Jersey.

10. Anexo A

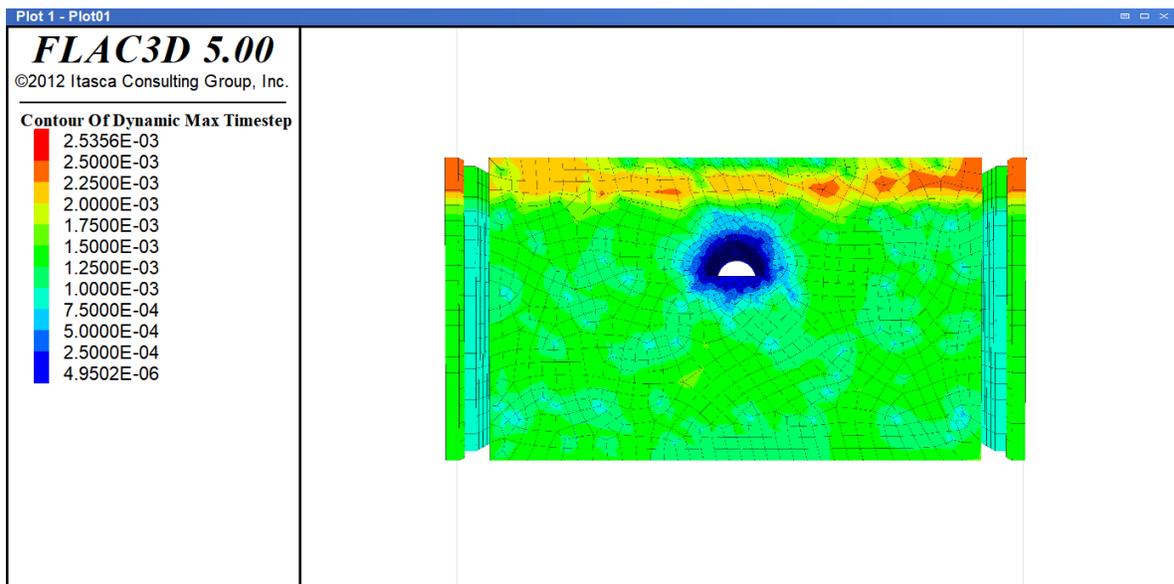


Figura 10. 1 Distribución de timestep en el modelo en función del tamaño y la rigidez del elemento

Criterios de vibraciones de norma FTA Report N° 123 (FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, 2018):

Tabla 10. 1 Interpretacion de los criterios de vibraciones. Extraido de (FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, 2018)

Curva de Criterio	Max LV, VdB (*)	Descripción del uso
Taller (ISO)	90	Vibración que se siente claramente. Apropiado para talleres y áreas que no sean tan sensibles a la vibración
Oficina (ISO)	84	Vibración que se puede sentir. Apropiado para oficinas y áreas similares que no sean tan sensibles a vibraciones
Residencial Día (ISO)	78	Vibración apenas sensible. Adecuado para equipos informáticos y microscopios ópticos de baja potencia (hasta x20)
Residencial noche, sala de operaciones (ISO)	72	Vibración no se siente, pero el ruido inducido del suelo puede ser audible dentro de habitaciones silenciosas. Adecuado para microscopios ópticos de potencia media (x100) y otros equipos de baja sensibilidad
VC-A	66	Adecuado para microscopios ópticos de potencia media a alta (x400), micro balanzas, balanzas ópticas y equipo especializado similar
VC-B	60	Adecuado para microscopios ópticos de alta potencia (x1000) y equipo de inspección y litografía a anchos de línea de 3 micrones
VC-C	54	Apropiado para la mayoría de los equipos de litografía e inspección con un tamaño de detalle de 1 micrón
VC-D	48	Adecuado en la mayoría de los casos para el equipo más exigente, incluidos los microscopios electrónicos que funcionan al límite de sus capacidades
VC-E	42	El criterio más exigente para los equipos extremadamente sensibles a vibraciones
(*) Medido en bandas de frecuencias de 1/3 de octava en el rango de frecuencias de 8 a 80 Hz		